

ÉVALUATION DES DISTOX

V. 1.0

Sommaire

1	Préambule.....	4
1.1	Objet de l'étude.....	4
1.2	Rédaction du compte-rendu de cette étude.....	4
2	Géométrie de la parallaxe	5
2.1	Avant propos	5
2.2	Présentation du principe d'évaluation	5
2.3	Deux repères parallèles	6
2.3.1	Etalonnage du théodolite.....	6
2.3.2	Qualification du DistoX.....	10
2.4	Parallaxe.....	15
2.5	Divagations vers d'autres expérimentations	16
2.5.1	Deux DistoX.....	16
2.5.2	Un DistoX, un compas et un théodolite.....	17
2.6	Etude de site	17
2.6.1	Définitions	17
2.6.2	Taille de la zone d'expérimentation	18
2.6.3	Zone d'expérimentation en surface.....	19
2.6.4	Remarque sur une difficulté prévisible	20
2.7	Etude des calculs de positions.....	20
2.7.1	Conversion des angles	20
2.7.2	Position $x y z$ en fonction des mesures du DistoX	22
2.7.3	Positions U V W ($x y z$) dans le repère du théodolite.....	23

2.8 Etude d'un trépied adapté au distoX	25
2.8.1 Avant propos.....	25
2.8.2 Matériel amagnétique.....	25
2.8.3 Le trépied photo de François	26
2.8.4 Problèmes posés par la tête supportant le DistoX	29
2.9 Etalonnage du nord vrai	34
3 Quel lieu idéal pour cette expérience ?	35
3.1 Présentation	35
3.2 Difficultés de mise en œuvre	36
3.2.1 Pour le théodolite	36
3.2.2 Pour les DistoX.....	36
4 Le matériel utilisé	38
4.1 Préparatifs	38
4.2 Le matériel disponible.....	39
5 Expérimentation à la Salamandre	40
6 Analyse des mesures de l'expérimentation	46
6.1 Avant propos	46
6.2 Mesures brutes sur le DistoX n°1 (celui de Dom)	47
6.3 Mesures brutes sur le DistoX n°2 (celui de Jean-Michel).....	48
6.4 Détails du fichier tableur de collecte des mesures brutes	49
6.4.1 Recherche de corrélations	51
6.4.2 Qu'en penser ?	53
6.4.3 Proposition	54

7	Effets et propagation des erreurs dans une topographie	54
8	Réflexions sur la précision d'une topo	56
9	Conclusion	59
10	Remerciements	60

1 **PRÉAMBULE**

1.1 **OBJET DE L'ETUDE**

Dans cette étude nous avons essayé d'évaluer la précision réelle d'un DistoX.

Il s'agit d'un distancemètre laser de marque Leica (modèle DistoA3 ou DistoX310) modifié pour la topographie souterraine en remplaçant une des deux cartes électroniques d'origine par une nouvelle carte créée et distribuée par Beat Heeb¹, (et par l'adjonction d'une batterie amagnétique au lithium sur le X310). Ainsi modifié, le DistoX permet la mesure des azimuts et communique en Bluetooth avec un périphérique externe muni d'un logiciel adapté (Auriga², PocketTopo¹ ou TopoDroid³).

Pour estimer la précision d'un DistoX il nous fallait établir une procédure de comparaison avec un appareil de relèvement topographique professionnel réputé fiable, c'est-à-dire un théodolite. Quelle que soit l'expérimentation mise en place, nous devons donc comparer deux types de positions :

- une position calculée à partir des seules mesures du DistoX,
- une position calculée à partir de la distance mesurée par le DistoX et des deux mesures d'angle effectuées avec le théodolite.

1.2 **REDACTION DU COMPTE-RENDU DE CETTE ETUDE**

Du fait de l'éloignement géographique des auteurs de cette expérimentation, l'un étant situé dans l'Hérault et l'autre en Seine-et-Marne, ce compte-rendu a été rédigé à quatre mains et par messagerie interposée.

Nous tenons donc à préciser au lecteur que, malgré tous nos efforts, il en résultera peut-être des redondances et un certain manque de cohésion de l'ensemble du texte.

¹ Voir sur <https://paperless.bheeb.ch/>

² Voir sur <http://auriga.top/>

³ Voir sur <https://sites.google.com/site/speleoapps/home/topodroid>

La seconde partie (2. Géométrie de la parallaxe) expose les différents problèmes techniques rencontrés dans les préparatifs et leur résolution mathématique (parallaxe) ou technique (bricolage d'un pied amagnétique). Les parties 3, 4 et 5 traitent plus précisément des préparatifs et du déroulement de la seconde expérimentation⁴ dans la grotte de la Salamandre (sur le plateau de Méjannes-le-Clap, Gard). Les parties 6 et 7 concernent le traitement et l'exploitation des données recueillies au cours de la journée à la Salamandre. Le texte se termine par des réflexions plus générales sur la topographie au DistoX.

2 GÉOMÉTRIE DE LA PARALLAXE

2.1 AVANT PROPOS

Cette partie du présent article a été rédigée avant de mettre en place l'expérimentation car elle en constituait l'étude de faisabilité. C'est cette étude qui a permis de mettre au point la feuille Excel qui devait permettre de vérifier ensuite, in situ, que le théodolite pointait bien sur le spot rouge du faisceau laser du DistoX.

L'auteur de ce chapitre ne possédant qu'un Leica Disto X310 non modifié, en général, dans cette partie du texte, il faut sous-entendre ce type d'appareil derrière l'intitulé « DistoX », comme si ce modèle était équipé d'un compas.

2.2 PRESENTATION DU PRINCIPE D'EVALUATION

L'idée initiale est de mettre en station (voir plus loin) un DistoX et un théodolite, environ sur le même plan horizontal mais à quelques mètres de distance (5 m) afin que la masse ferromagnétique du théodolite ne perturbe pas le fonctionnement du DistoX. A priori cette installation est faite sous terre afin de :

- profiter d'un environnement magnétique non perturbateur,
- disposer d'une grande surface de projection du spot rouge du DistoX, en particulier pour des angles de sites divers,
- pouvoir viser le spot avec la lunette du théodolite en profitant de la pénombre.

Nous partons du principe que le DistoX définit un repère tridimensionnel orthonormé, donc 3 axes x , y , z perpendiculaires entre eux avec la même unité métrique.

- L'axe z est la verticale passant par le centre du DistoX⁵;
- L'axe y est dirigé dans le plan horizontal vers le nord magnétique identifié par le DistoX (la direction pour laquelle le DistoX affiche 0 °);

⁴ Pour lire le compte-rendu de la première expérimentation au « Col de Thalys » voir :

<http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Disto%20X%20vs%20Theodolite%202017%20CR.pdf>

⁵ La position physique de ce centre n'a pas encore pu être déterminée expérimentalement; c'est une étude qui reste à faire.

- L'axe x est aussi dans le plan horizontal et dirigé vers l'azimut 90° (vers 3 heures en vue de dessus ou si on préfère vers l'Est).

Le théodolite, convenablement mis en station (plan horizontal et vertical), définit quant à lui un repère u, v, w , disposé de façon à ce que les 3 axes u, v, w soient parallèles aux axes x, y, z définis par le DistoX ($x//u, y//v, z//w$) comme le montre la figure suivante :

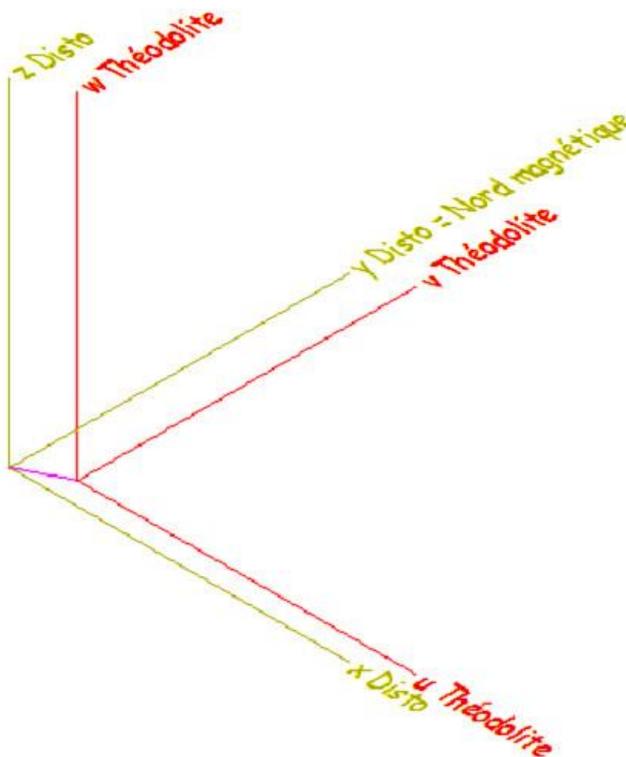


Figure 1 : Représentation lointaine des deux repères

2.3 DEUX REPERES PARALLELES

2.3.1 Etalonnage du théodolite

2.3.1.1 Vue générale

Plus précisément, dans la figure suivante, on a placé le centre du théodolite en $x=5, y=1, z=1$ (dans le repère du DistoX). L'agrandissement sur la figure 2. ci-après, montre des cercles cyan et vert marquant les unités ; les croix rouges désignent les intersections de ces cercles avec les axes dessinés. Il s'agit d'une vue cavalière depuis le Sud-est, comme précédemment.

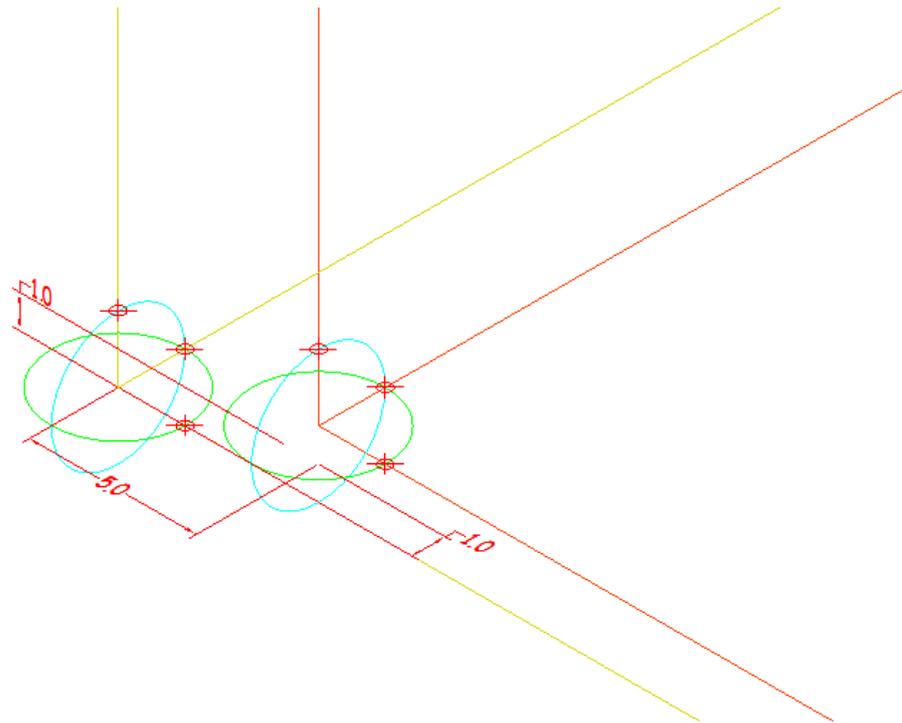


Figure 2 : Détail aux origines des repères

On peut déterminer, par des mesures depuis le DistoX, la position du centre du théodolite dans le repère x, y, z (défini par le DistoX). Ci-après le schéma théorique d'un théodolite; le centre d'articulation est en O .

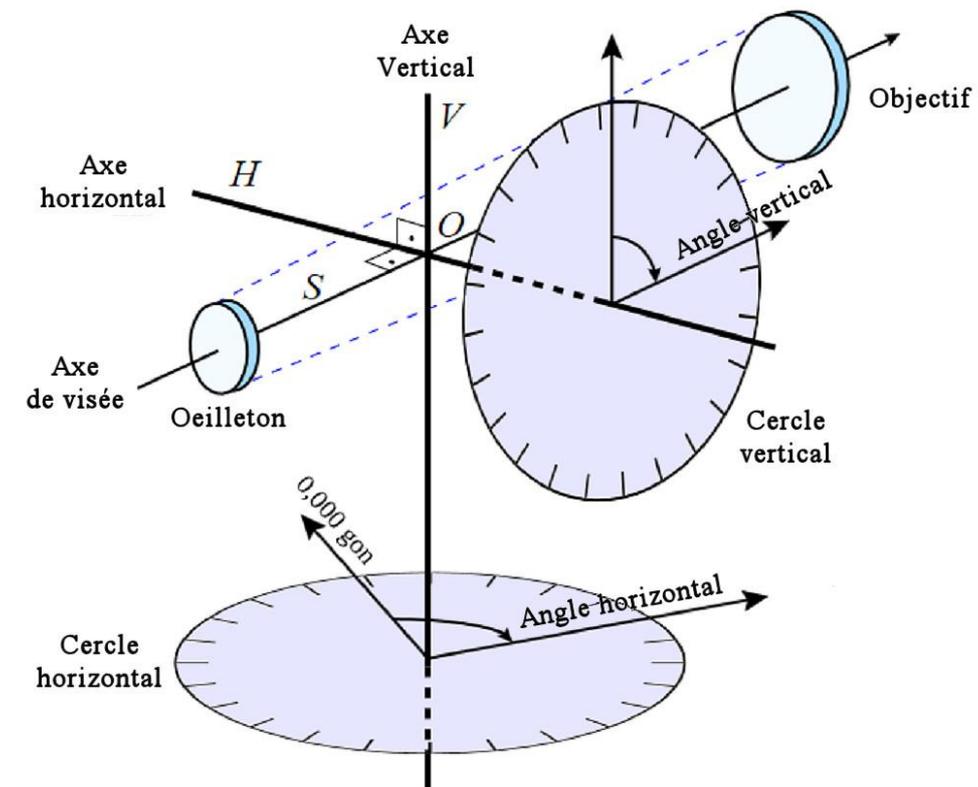


Figure 3 : Schéma théorique d'un théodolite

Quand le théodolite est mis en station, le 0,00 gon (gon est l'abréviation d'unité d'angle utilisée pour les grades) a une orientation dans le plan horizontal mais sa direction est quelconque. Elle est néanmoins fixe (constante) dès que le théodolite est solidarisé à son trépied. L'angle vertical (zénithal) est marqué **V** sur le théodolite et l'angle horizontal **H_z**. Afin de disposer d'un axe ν parallèle à l'axe y il va être nécessaire, par le calcul, de corriger la valeur de l'angle horizontal **H_z** pour mettre les angles dans le bon sens et les mesurer depuis le nord. Ceci définit une sorte de zéro virtuel, calé sur l'axe ν qui sera utilisé dans les calculs.

2.3.1.2 Étalonnage du site de mesure

On procède donc nécessairement à un **étalonnage** du site de mesure.

- En visant, depuis le théodolite, le DistoX, on mesure un angle **H_z** de valeur **M** et un angle vertical **V**
- Inversement, en plaçant le spot du DistoX sur le théodolite, le DistoX indique un relèvement **G**, un dénivelé **N** et une distance horizontale **d**⁶.

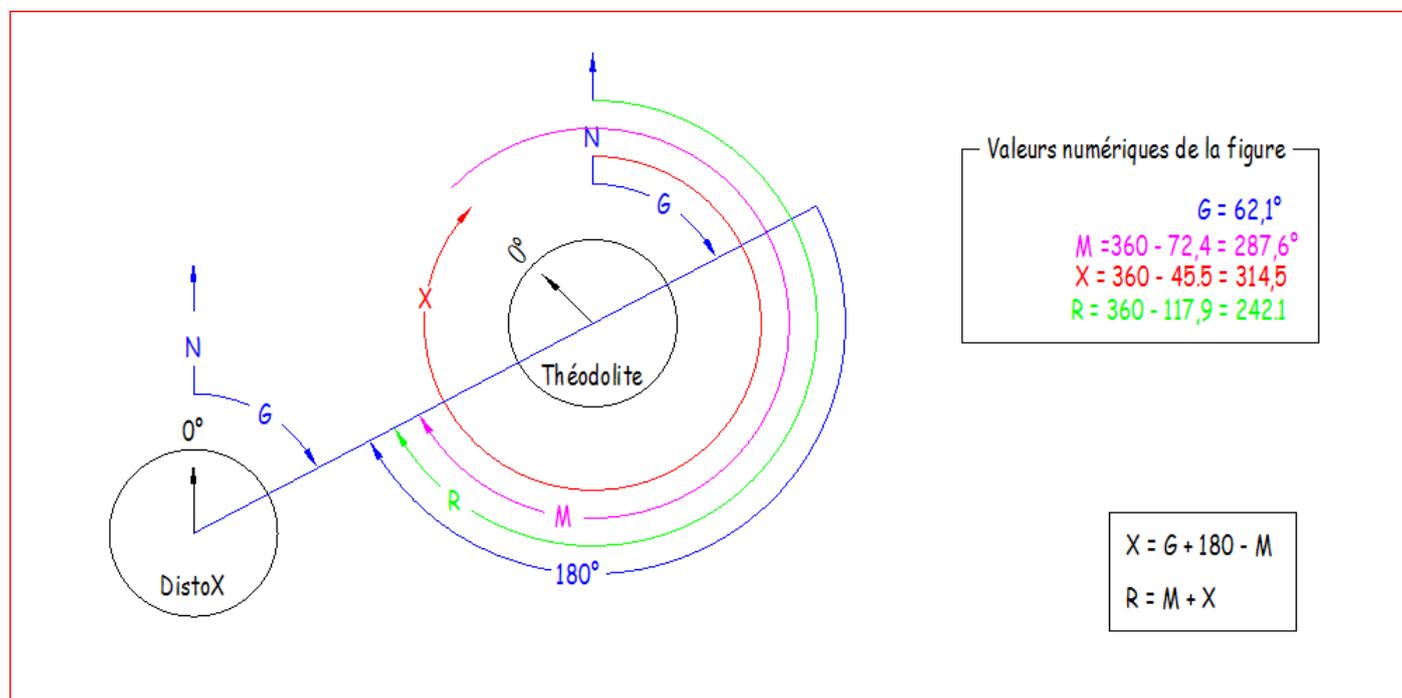


Figure 4 : Étalonnage de l'angle de relèvement du théodolite

2.3.1.3 Démonstration

Du fait des angles orientés, dans tous les quadrants, en observant la figure on peut établir en suivant les flèches, ($\pi = 180^\circ$) :

⁶ Attention à ne pas confondre la distance optique réelle dans l'espace, qu'on dénomme **D** et la distance projetée sur le plan horizontal **d**. En pratique, comme on produit en général un dessin (topographie) en projection, on utilise peu la distance optique.

$$X + M - R = 0$$

$$G + \pi - R = 0$$

Soit en soustrayant membre à membre :

$$X + M - R - G - \pi + R = 0$$

Donc $X = \pi + G - M$ qui, une fois déterminé, devient une constante pour le site. Ensuite, pour chaque valeur **M** de **Hz**, lue sur le théodolite, on détermine le relèvement⁷ vrai **R** par

$$R = M + X$$

2.3.1.4 Normalisation

Il faut néanmoins normaliser le résultat à 1 tour près et rester dans les conventions des gisements :

- angle toujours positif,
- valeur comprise entre $[0,360[$ si on est en degrés.

Il faut être prudent quand on réalise cette normalisation en utilisant une fonction *Modulo*. En mathématique modulo n'est pas une fonction mais le reste de la division entière d'un nombre par un autre. Certaines fonctions de bibliothèque supportent mal un des arguments négatifs. Excel s'en tire bien et montre cette table de vérité qui est utilisable.

Valeur	MOD (Valeur;360)
10	10
-1	359
400	40
-360	0
361	1
-361	359
0	0

On pourra donc appliquer cette fonction pour normaliser les résultats quand on souhaite produire un gisement. Si on veut utiliser des fonctions trigonométriques sur ces valeurs, il faut être conscient que les gisements tournent dans le sens inverse du sens trigonométrique. Si, là aussi

⁷ Est-il nécessaire de rappeler que le relèvement est l'angle, compté positif dans le sens des aiguilles d'une montre, entre le nord et la direction de l'objet relevé (cible). Dans l'expérimentation, il s'agit d'un relèvement magnétique (du lieu donné, par rapport au nord magnétique et à l'instant t).

on utilise Excel, attention : Excel suppose que l'angle est en radians. Nous aurons donc des grades, des degrés et des radians et ceci dans les deux sens⁸.

2.3.1.5 Vérification numérique

Avec DraftSight, qui a servi à produire la figure 4. (Étalonnage de l'angle de relèvement du théodolite) les différents angles ont été mesurés et sont indiqués en marge du croquis. Avec les égalités ci-dessus on calcule :

- $X = (180^\circ + 62,1^\circ) - 287,6^\circ = -45,5^\circ$ soit en prenant le modulo 314,5 °
- $R = 314,5^\circ + 287,6^\circ = 602,1^\circ$ soit en prenant le modulo 242,1 °

Ouf, il n'y a pas d'erreur : on l'a échappé belle !

2.3.1.6 Étalonnage du Nord magnétique vrai

On verra par la suite qu'il peut être possible, avec le théodolite, de viser un objet terrestre lointain. À partir de la position de l'objet et de celle du théodolite (en longitude et latitude par exemple), on peut, en connaissant la déclinaison magnétique déterminer la direction du nord magnétique vrai local et ainsi *étalonner* le théodolite. Concrètement on dira que le nord magnétique vrai correspond à la graduation XXX.xx grades lue sur le théodolite⁹. De proche en proche, cela caractérisera un écart avec le DistoX et il s'agira de l'écart entre :

- la valeur **G** (relèvement sous lequel le DistoX voit le théodolite),
- et la valeur **G'** vraie, calculée par rapport au relèvement géographique.

C'est cette valeur de **G** qui est comparée. On dira par exemple que quand le DistoX indique **G**=32° magnétique, il pointe en fait au 32.8° magnétique vrai. On ne qualifie donc pas le zéro du DistoX mais la valeur **G**=32°. Si le DistoX ne produit qu'un écart systématique (constant), l'écart de son 0° sera le même, mais si l'écart dépend de l'angle de relèvement, seul le relèvement 32° sera *étalonné*.

2.3.2 Qualification du DistoX

2.3.2.1 Résolution de la pente

En ce qui concerne la pente, le DistoX affiche des données redondantes qu'il calcule en interne à partir de capteurs à torsion; à ce titre, la valeur angulaire de la pente n'est pas plus *native* que les autres. Nous devons répondre à la question suivante : Doit-on travailler avec :

- l'angle de pente donné par le DistoX,
- les données de longueurs qu'il fournit ?

⁸ La feuille de calcul liée au projet détaille une à une ces étapes.

⁹ On néglige les non linéarités inhérentes au théodolite.

Quelques essais sur un DistoX montrent que les valeurs des longueurs et des angles sont parfaitement cohérentes entre elles. On ne gagne rien à utiliser l'une plutôt que l'autre, ce qui est rassurant.

Angle en degrés	D (optique)	d (horizontale)	h (dénivelé)	D x Cosinus	D x Sinus	Ecart Pythagore	Angle calculé en degrés	Ecart angulaire en degrés
24,50	3,62	3,29	1,51	3,29	1,50	0,00	24,73	-0,23
12,80	6,24	6,08	1,32	6,08	1,38	0,01	12,24	0,56
57,00	2,16	1,18	1,82	1,18	1,81	0,00	57,04	-0,04
-6,90	3,36	3,34	-0,40	3,34	-0,40	0,00	-6,86	-0,04
2,50	10,65	10,64	0,47	10,64	0,46	0,00	2,54	-0,04
61,20	2,09	1,01	1,83	1,01	1,83	0,00	61,15	0,05
0,60	3,51	3,51	0,04	3,51	0,04	0,00	0,62	-0,02
23,10	4,29	3,95	1,68	3,95	1,68	0,00	23,06	0,04
3,00	10,57	10,55	0,56	10,55	0,55	0,00	3,04	-0,04

Figure 5 : Résolution d'un DistoX

A priori, on utilisera les valeurs métriques :

- de la distance projetée (en mètres)
- du dénivelé¹⁰ (en mètres).

On évitera ainsi un problème d'unité (grades, degrés).

2.3.2.2 Précision de la pente

Par ailleurs, il semblait pertinent d'évaluer la précision de la mesure de l'angle de pente du DistoX. Une expérimentation a donc été menée en plaçant le DistoX sur la lunette du théodolite et en interposant une grosse cale en aluminium pour rester hors de la fourche lors de la rotation, car le DistoX, trop large, ne rentre pas dans celle-ci.

¹⁰ Il s'agit de la différence d'altitude entre l'instrument et la cible, comptée positivement si la cible est plus haute que l'instrument.



Figure 6 : Le DistoX posé sur le théodolite pour évaluer la pente

L'évaluation n'est pas simple car le DistoX affiche une valeur arrondie de l'angle avec une résolution de $\frac{1}{2}$ degré. 0° 0.5° 1° 1.5° 2° 2.5° etc. Pour comparer la pente, on lit la mesure sur le limbe du théodolite au travers d'un dispositif optique; on obtient donc une valeur continue *analogique*. Il est à noter que le limbe est gradué de la façon suivante :

- les grades entiers sont gravés en valeur 10 11 12 13 etc.
- Il y a de petites divisions (segments) marquant les $1/10^{\text{ème}}$ de grade et le cinquième segment est un peu plus long. On extrapole la mesure entre les segments en *annonçant* le $1/100^{\text{ème}}$ de grade^{11 12}.

Lors de la comparaison, il a donc fallu encadrer les valeurs affichées par le DistoX par 2 mesures sur le théodolite, sur la base du clignotement avec la valeur à $\frac{1}{2}$ degré au-dessus et $\frac{1}{2}$ degré au-dessous. L'exemple suivant concerne l'évaluation d'une pente de 8° ; on fait deux mesures :

- une mesure théodolite quand 7.5° clignote avec 8° ,
- une mesure théodolite quand 8.5° clignote avec 8° .

On calcule ensuite la moyenne algébrique de ces valeurs pour produire le graphe de comparaison ci-après :

¹¹ On est loin de la qualité des théodolites de précision, dits « à la seconde », puisque $1/100^{\text{ème}}$ de grade est égal à 40 secondes d'arc.

¹² La nivelle montée directement sur la lunette est, elle aussi, graduée en petites divisions sous lesquelles la bulle se déplace; une petite division correspond à $1/100^{\text{ème}}$ de grade.

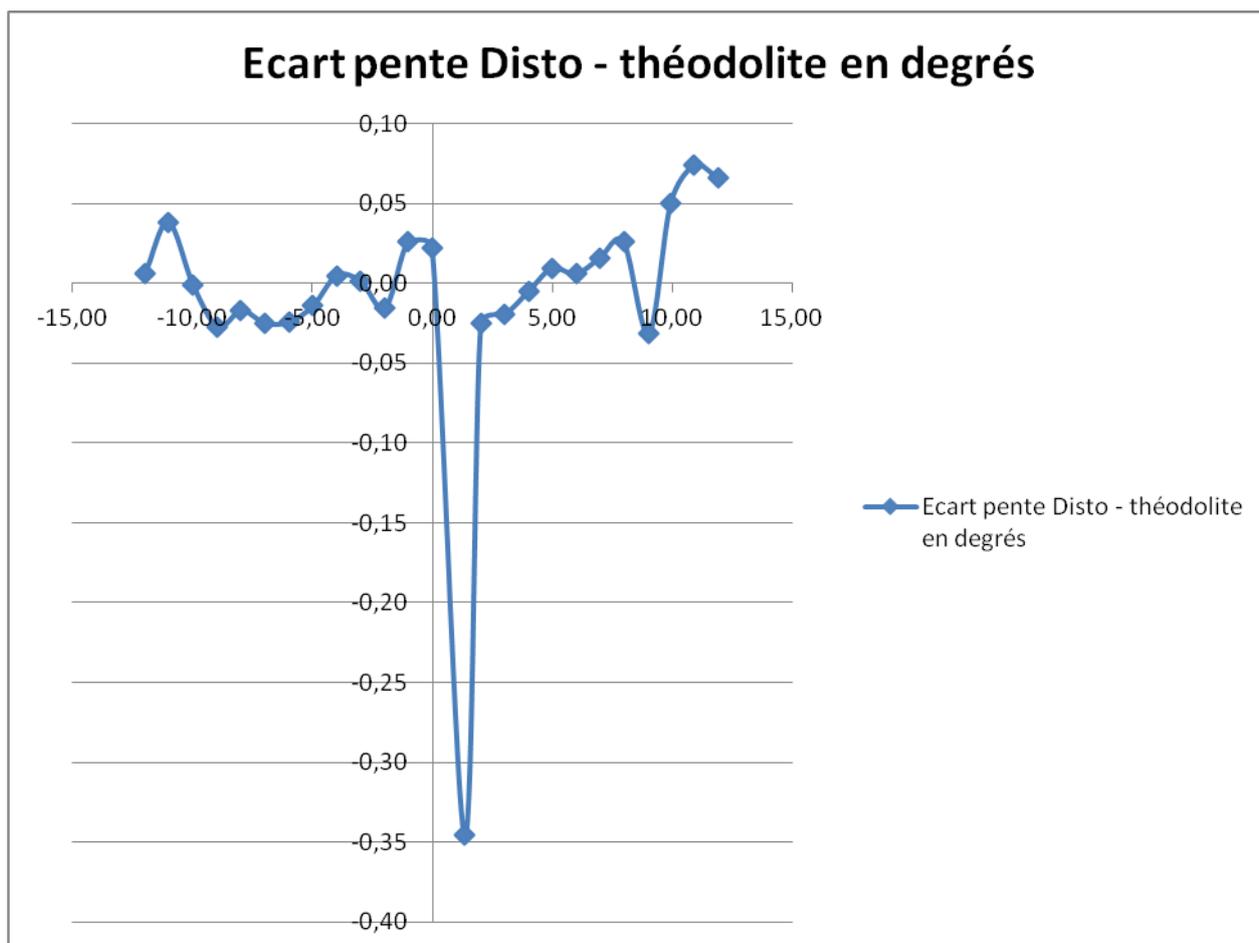


Figure 7 : Précision de mesure de la pente d'un DistoX

Le pic inférieur sur le graphe correspond probablement à une erreur de report¹³ de la lecture du théodolite. La résolution de 0,5 ° du DistoX masque la précision qui est voisine du 1/10 de degré (le graphe est en degrés). Cette vérification justifie d'utiliser, en confiance, les valeurs numériques de dénivelé qui sont affichées avec plus de décimales. On va lire un dénivelé de 2,458 m¹⁴ (résolution affichée au millimètre) alors qu'on lira 2,5 ° (résolution affichée au demi-degré).

2.3.2.3 Réflexion sur le centre de la mesure du relèvement magnétique

Le photomontage qui suit montre les dimensions en millimètre des composants.

¹³ Les valeurs lues sur le théodolite doivent être annoncées, à la voix, sous la forme « vingt et un grades zéro huit » pour 21,08 gons; un aide écrit cette valeur entendue et peut, éventuellement, la répéter pour vérification.

¹⁴ Il faut prendre l'habitude de toujours annoncer les longueurs (ou dénivelés) en mètres suivi du nombre de millimètres. On annoncera dans ce cas « deux mètres quatre cent cinquante huit ». Ne pas normaliser l'annonce est piégeux pour des valeurs du type 0,125 1,025 1,250 etc. Les zéros sont redoutables en topographie.

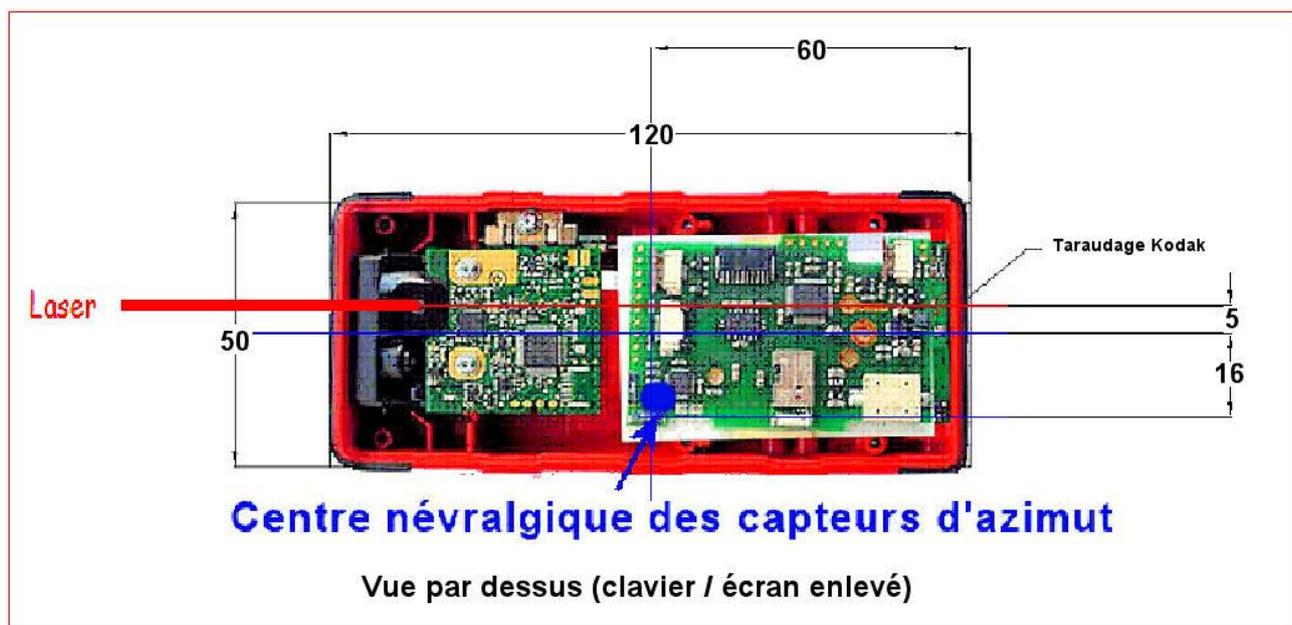


Figure 8 : Les cotes du DistoX

Quand on fait tourner le DistoX autour de l'axe vertical du pied, l'axe de mesure du relèvement reste toujours parallèle à l'axe du laser. C'est donc toujours le relèvement du laser qui est indiqué. Par contre le désaxement de l'axe du laser par rapport au point de rotation du DistoX apporte une imprécision de la mesure des angles.

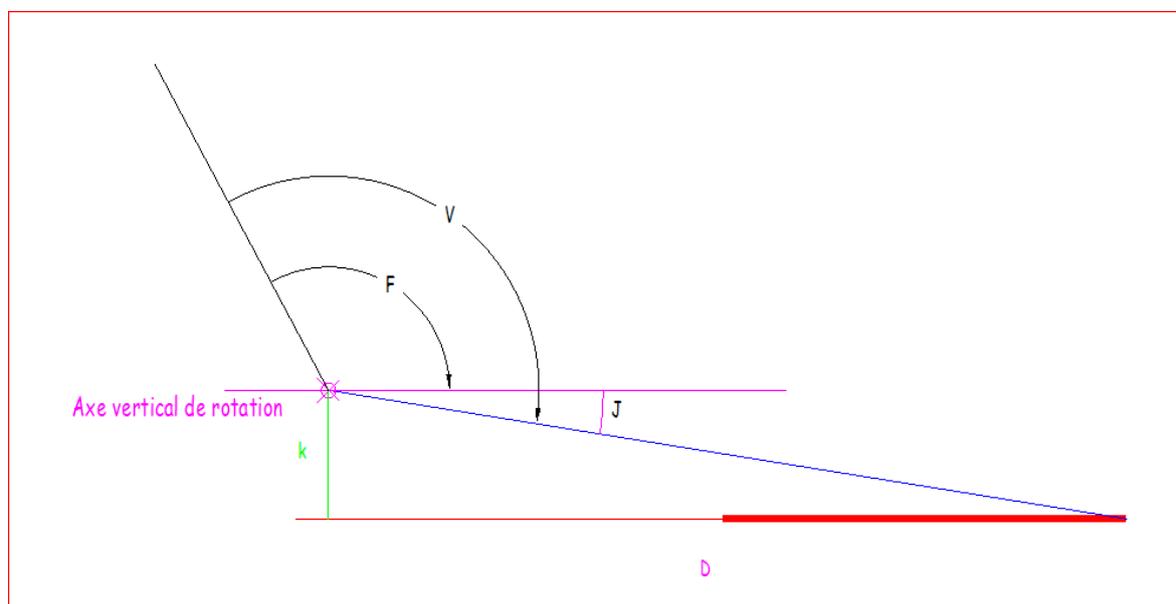


Figure 9 : Erreur provoquée par le décentrement du capteur magnétique

On croit mesurer l'angle V , mais en fait on mesure l'angle F . Curieusement $V = F + |J|$

avec $j = \arctg\left(\frac{K}{D}\right)$ et $k = 5 \text{ mm}$

Par exemple, pour une mesure à $D = 5$ m, il faut ajouter $0,12^\circ$ à la mesure. Évidemment, plus D est grand, plus J est petit. Sur de tout petits trajets, en étroiture par exemple, il pourrait être utile de corriger cette parallaxe. Le classeur de calcul corrige la mesure du gisement DistoX de cette déformation.

2.4 PARALLAXE

Nous avons donc mis en place un dispositif permettant de mesurer les effets de la parallaxe¹⁵. Supposons que le DistoX fasse une tache lumineuse sur un objet matériel de l'espace (par exemple sur la voûte d'une cavité souterraine). On va appeler cette tache, le "spot" ou "point". Si on déclenche une mesure, le DistoX va mesurer (et calculer) :

- le relèvement du point c'est-à-dire l'angle, dans la projection horizontale, entre le nord magnétique et ce point, orienté dans le sens des aiguilles d'une montre (vue par-dessus)¹⁶ c'est à dire dans le sens inverse conventionnel trigonométrique,
- l'élévation du point, c'est-à-dire l'angle, dans le plan vertical, entre l'horizontale et une droite passant par le point; la convention étant que cet angle est positif quand le point est au-dessus de l'horizon du DistoX et négatif au-dessous. Comme on l'a déjà vu, le DistoX calcule et affiche aussi le dénivelé en mètres et on utilisera cette valeur du dénivelé,
- la distance du trajet optique D entre le DistoX et le point; c'est d'ailleurs la mesure de base du DistoX et largement la plus précise. Le DistoX calcule et affiche aussi la distance projetée d sur le plan x,y On utilisera en général cette valeur d .

À partir de ces mesures on pourra déterminer, par le calcul, la position x, y, z du point dans le repère défini par le DistoX; c'est de la topographie ordinaire.

La lunette du théodolite va viser, elle aussi, le point rouge et permettra de lire sur le théodolite :

- un angle vertical (angle zénithal) entre la verticale et la direction vers le point (le zéro étant sur la verticale) voir 2.6.1,
- un angle horizontal, qu'on pourra, par le calcul, normaliser par rapport à une direction ' v ' parallèle au ' y ' du DistoX.

Hélas, le théodolite n'indiquera pas la distance¹⁷ entre son centre et le point.

¹⁵ Wikipédia : la parallaxe est l'incidence du changement de position de l'observateur sur l'observation d'un objet. En d'autres termes, la parallaxe est l'effet du changement de position de l'observateur sur ce qu'il perçoit. Dans notre cas il s'agit de deux observations simultanées depuis deux positions fixes.

¹⁶ Exemple : si la cible est au nord-est, le relèvement est de 45°

¹⁷ On peut mesurer une distance avec un théodolite en utilisant une mire au niveau de la cible et les fils stadimétriques. Mais cette mesure est peu précise et, dans notre cas, il est impossible de placer une mire sur les parois ou les concrétions de la cavité au niveau du spot rouge.

Par le calcul des mesures issues du DistoX, on peut déterminer les coordonnées du point dans le repère du théodolite. Ce calcul n'est pas bien compliqué puisqu'il s'agit d'une simple translation et on a déterminé le vecteur de translation :

- origine : le centre du DistoX,
- extrémité : le centre du théodolite.

Par le calcul toujours, on peut déterminer, à partir des mesures du DistoX, la distance *théorique* entre le centre du théodolite et le point (spot). Comme le théodolite ne mesure pas de distance, on va réutiliser cette distance théorique pour calculer, en fonction des deux mesures angulaires fournies par le théodolite, les coordonnées, que nous appellerons virtuelles (image) de ce point, dans le repère du théodolite.

Ainsi, dans le repère du théodolite, un même point (tache ou spot lumineux rouge) aura donc 2 coordonnées :

- des coordonnées théoriques issues des mesures du DistoX,
- des coordonnées virtuelles déterminées à partir des mesures angulaires du théodolite et de la distance venant du DistoX.

L'évaluation du DistoX reposera sur les relations qui lient ces deux jeux de coordonnées. On peut, par exemple, envisager de calculer la distance (dans l'espace) qui sépare ces deux jeux de coordonnées et examiner, graphiquement, dans une représentation 3D, cette distance en fonction de l'angle de site et de l'angle d'azimut... ou de l'âge du capitaine. C'est la tendance des relations constatées après une campagne de mesures qui nous guidera vers des présentations graphiques pertinentes et interprétables.

NB : voir plus loin au point 6.

2.5 DIVAGATIONS VERS D'AUTRES EXPERIMENTATIONS

2.5.1 Deux DistoX

La présente évaluation repose sur l'utilisation d'un DistoX et d'un théodolite, mais on pourrait également installer deux DistoX et utiliser les mêmes formules de comparaison ce qui permettrait d'évaluer les écarts entre les deux appareils et, en quelque sorte, la fidélité de ces DistoX, sans pouvoir en évaluer véritablement la précision.

Les intérêts de ce dispositif seraient :

- une vérification sur une plus grande étendue de valeur de l'angle de site, puisqu'on ne serait plus contraint par les limites du théodolite,
- une mise en œuvre sur site plus simple et assez facilement reproductible pour tenter de comprendre pourquoi un DistoX perd son étalonnage.

Néanmoins, les tableaux de mesures devraient (devront) être adaptés à ce type d'évaluation.

2.5.2 Un DistoX, un compas et un théodolite

Si on utilise un DistoX d'origine, n'intégrant pas la mesure du relèvement magnétique, on peut remplacer la mesure manquante par un relèvement avec un compas classique (genre Plastimo IRIS 50). L'intérêt serait alors de quantifier les erreurs que produit cette méthode, en particulier pour des angles de site importants, au-dessus ou au-dessous de l'horizontale. Les tableaux de la méthode DistoX + théodolite sont utilisables, le compas étant en général en degrés.

2.6 ETUDE DE SITE

2.6.1 Définitions

L'appareil de référence, le TO5 est gradué en grades. Dans le plan vertical, il donne la mesure de l'angle entre la verticale et la direction de la visée : c'est l'angle zénithal. Il fournit une image redressée¹⁸ (et non tête en bas) ce qui rend la lecture confortable.

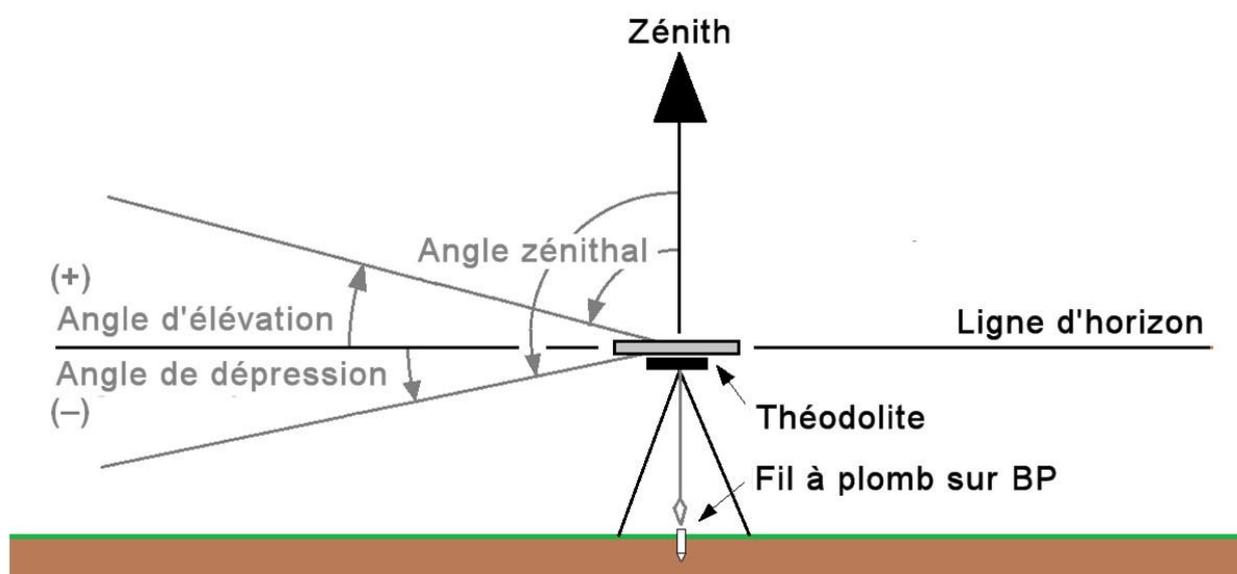


Figure 10 Angle zénithal

Le théodolite WILD TO5, présente des limites de visées en site (angle vertical). En effet :

- à site faible, la lunette pointe vers le bas et la visée butte sur le socle du théodolite,
- à site fort, la lunette pointe vers le haut et c'est l'oculaire, et donc l'œil de l'opérateur, qui butte sur le socle.

C'est en fait le chercheur¹⁹ qui limite le plus le champ vertical entre 66 et 150 gon (rappel : « gon » est l'abréviation de l'unité légale des grades).

¹⁸ C'est en général le cas des théodolites dits « de chantier ».

¹⁹ Système simple de visée placé sur une lunette, comportant généralement un GUIDON et un OEILLETON qui permet de dégrossir le pointé. Dans le cas du TO5 c'est l'image virtuelle d'un croisillon, blanc sur fond

2.6.2 Taille de la zone d'expérimentation

On peut donc esquisser un croquis du site idéal.

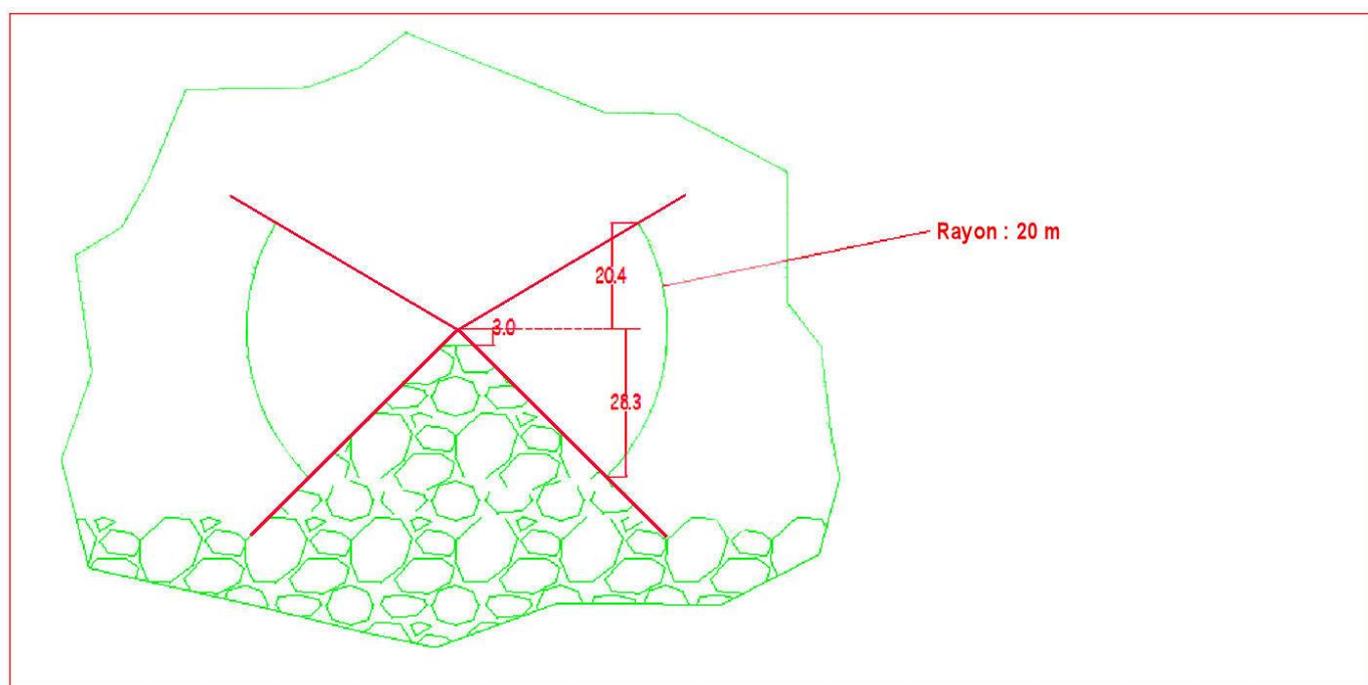
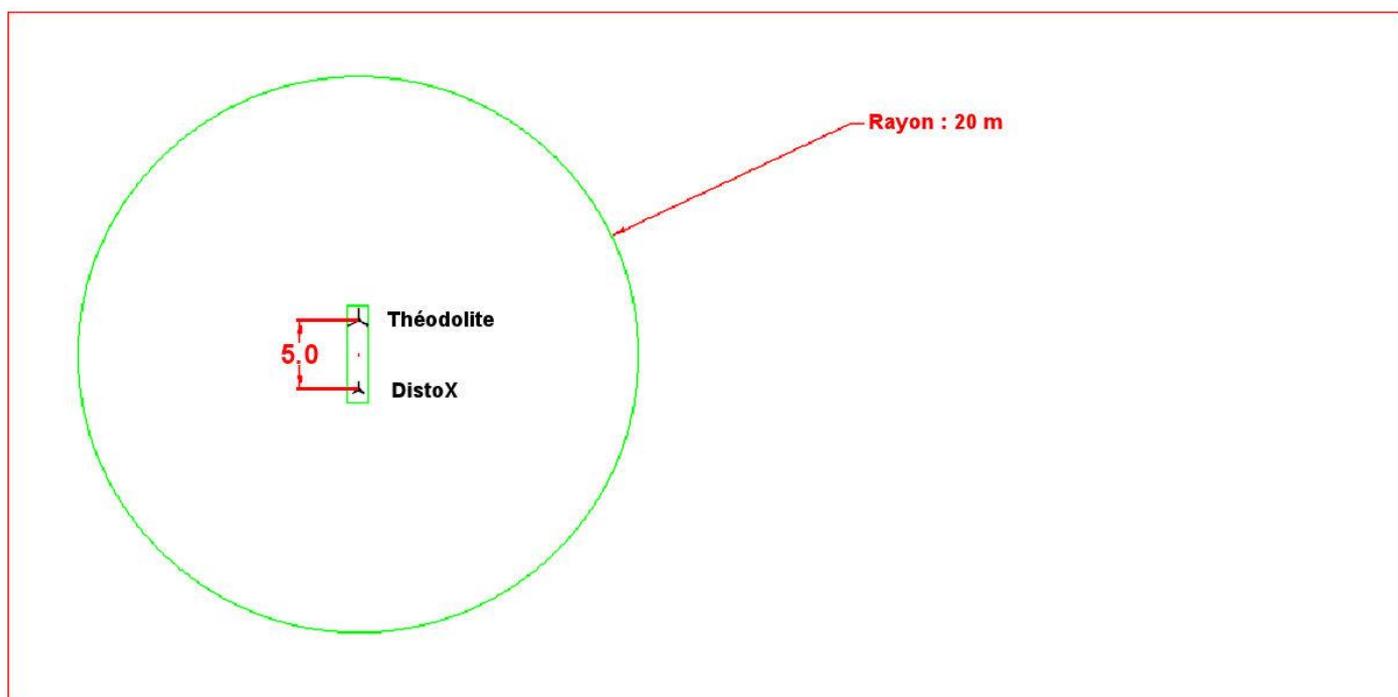


Figure 11 : Coupe d'un site idéal



noir, qui se superpose à la vue naturelle de l'opérateur. Le champ du théodolite est assez réduit et chercher la cible sans pointeur serait quasi impossible sur un fond presque uniforme comme la voûte d'une cavité.

Figure 12 : Vue en plan d'un site d'expérimentation

On peut envisager un site plus réaliste²⁰ :

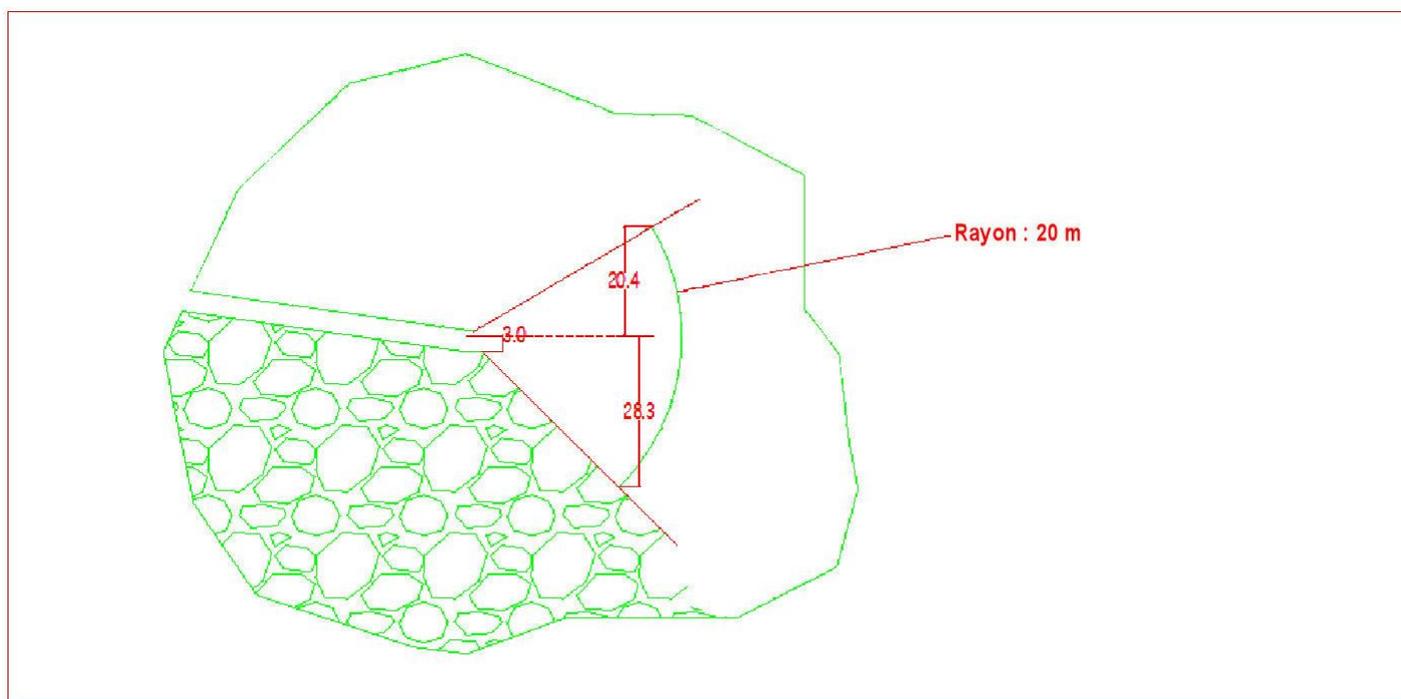


Figure 13 : Coupe d'un site réaliste

Toute restriction amenée par le site réel limitera les possibilités d'expérimentation. On peut penser qu'on ne trouvera, au mieux que la moitié du site (gauche ou droite sur la figure 11). Évidemment des dimensions plus grandes que le gabarit minimal sont satisfaisantes, sauf, peut-être pour le diamètre ; mais on pourrait aller jusqu'à 40 m sans avoir de grosses difficultés de pointage.

2.6.3 Zone d'expérimentation en surface

On doit aussi envisager une évaluation en deux passes :

1. une sur un site, a priori souterrain, comme le montrent les exemples ci-avant, peut-être limité en valeurs possibles d'azimut, la priorité étant l'évaluation sur des valeurs de site (angle d'élévation ou de dépression) assez diverses,
2. une, à plat ou presque, qui pourrait se faire en surface, pour évaluer le DistoX sur un large domaine de variation de l'azimut et permettre de caler le Nord vrai du DistoX en se référant à un objet terrestre lointain.

La seconde peut se faire de nuit, en surface. Nous n'aurions plus la contrainte de l'expérimentation du « Col de Thalys »²¹ qui, n'utilisant pas les possibilités de la parallaxe mais une

²⁰ Il s'avèrera que le site réel que nous utiliserons : Aven-Grotte de la Salamandre (30) ressemble fortement à ce croquis théorique, avec même des possibilités de visées à 360°.

technique de substitution, nous obligeait à marquer physiquement les cibles sur des supports matériels (les piquets).

En exploitant la méthode avec parallaxe, qui ne nécessite plus de substitution, on peut imaginer d'installer les instruments au milieu d'une place ou d'un pré et de faire tourner autour, à une vingtaine de mètres, une énorme cible, qui pourrait être une voiture afin de ne pas être trop sensible au vent. Le plus difficile, à l'extérieur, c'est de trouver la cible avec le spot car le laser ne dessine rien sur le ciel, sauf à enfumer le site. Il faudrait donc une grande cible. La cible réellement prise en compte étant le spot rouge, la taille physique de la cible n'a aucune importance.

NB : cette expérimentation par parallaxe en surface, n'a pas encore été réalisée.

2.6.4 Remarque sur une difficulté prévisible

En relisant les fichiers tableur de François, Dom emporté par son optimisme et absorbé par la correction de l'orthographe, n'a aperçu au préalable aucune difficulté prévisible lors de l'usage du DistoX pendant l'expérimentation à venir.

Hélas, la suite fut quelque peu différente sur place ! Heureusement que la préparation permettait une "boucle de rattrapage" ce qui n'a donc pas entraîné de conséquence grave²².

2.7 ÉTUDE DES CALCULS DE POSITIONS

2.7.1 Conversion des angles

Le passage des gisements aux angles trigonométriques mérite qu'on s'y attarde quelque peu pour éviter de faire une erreur de signe²³.

²¹ Le compte-rendu de cette première expérimentation est disponible à l'adresse :

<http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Disto%20X%20vs%20Theodolite%202017%20CR.pdf>

²² Voir le problème de dénivelé z aux points 2.7.2 et 5.2 de cet article.

²³ Ça arrive même à des gens très bien et je m'en suis rendu compte lors d'une application numérique. J'avais écrit $T = \frac{\pi}{2} - G$ qui va beaucoup moins bien ☹!

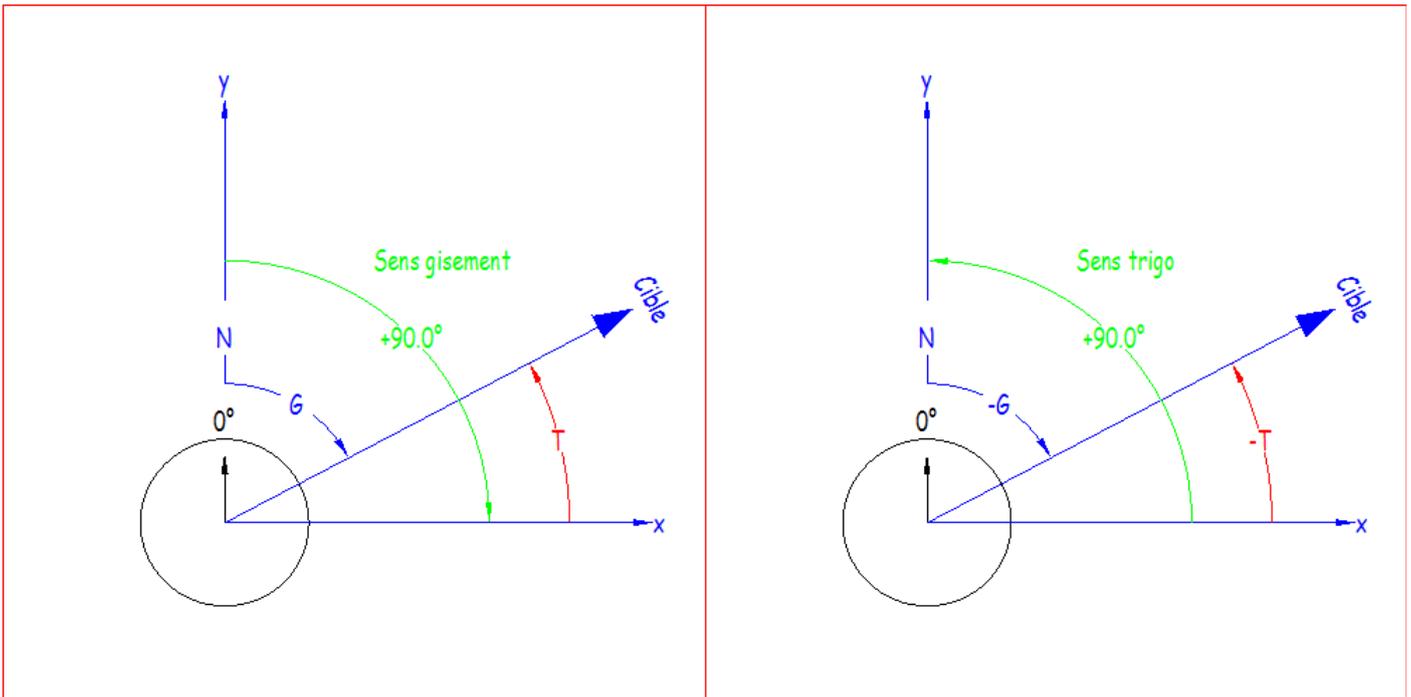


Figure 14 : Gisement et angle trigonométrique

Dans les deux cas, il s'agit de la même géographie. Le nord est en y , l'est en x et la direction de la cible est la même.

- À gauche on est dans un repère dont les angles sont comptés positifs dans le sens des gisements (sens des aiguilles d'une montre).
- À droite on est dans un repère dont les angles sont comptés positifs dans le sens trigonométrique (sens inverse des aiguilles d'une montre).

Voilà pourquoi, sur la figure de droite, comme on a laissé les flèches des angles dans le même sens (sens de parcours ou de rotation), il faut écrire $-G$ et $-T$. Si on parcourt la figure :

- À gauche : $T - G + \frac{\pi}{2} = 0 \Rightarrow T = G - \frac{\pi}{2}$
- À droite : $-T - (-G) - \frac{\pi}{2} = 0 \Rightarrow -T + G - \frac{\pi}{2} = 0 \Rightarrow T = G - \frac{\pi}{2}$

Dans les deux cas de figure : $T = G - \frac{\pi}{2}$

Concrètement, dans l'exemple, considérons G sans tenir compte de la flèche d'orientation; cet angle a une valeur de 62° (sans application d'un signe + ou -). On parle ensuite de l'angle orienté G qu'on balaye quand :

1. on vise le nord,
2. on se tourne pour viser la cible.

Le mouvement de rotation que l'on fait est indépendant du repère (dans notre cas on se tourne du nord vers l'est d'un angle de 62°). Conventionnellement :

- sur la figure de gauche, dans le système des gisements, on dit que cette rotation est positive parce qu'elle suit le sens conventionnel des gisements,
- sur la figure de droite, dans le système trigonométrique, on dit que cette rotation est négative parce qu'elle se fait en sens inverse.

2.7.2 Position $x y z$ en fonction des mesures du DistoX

2.7.2.1 Position $x y$

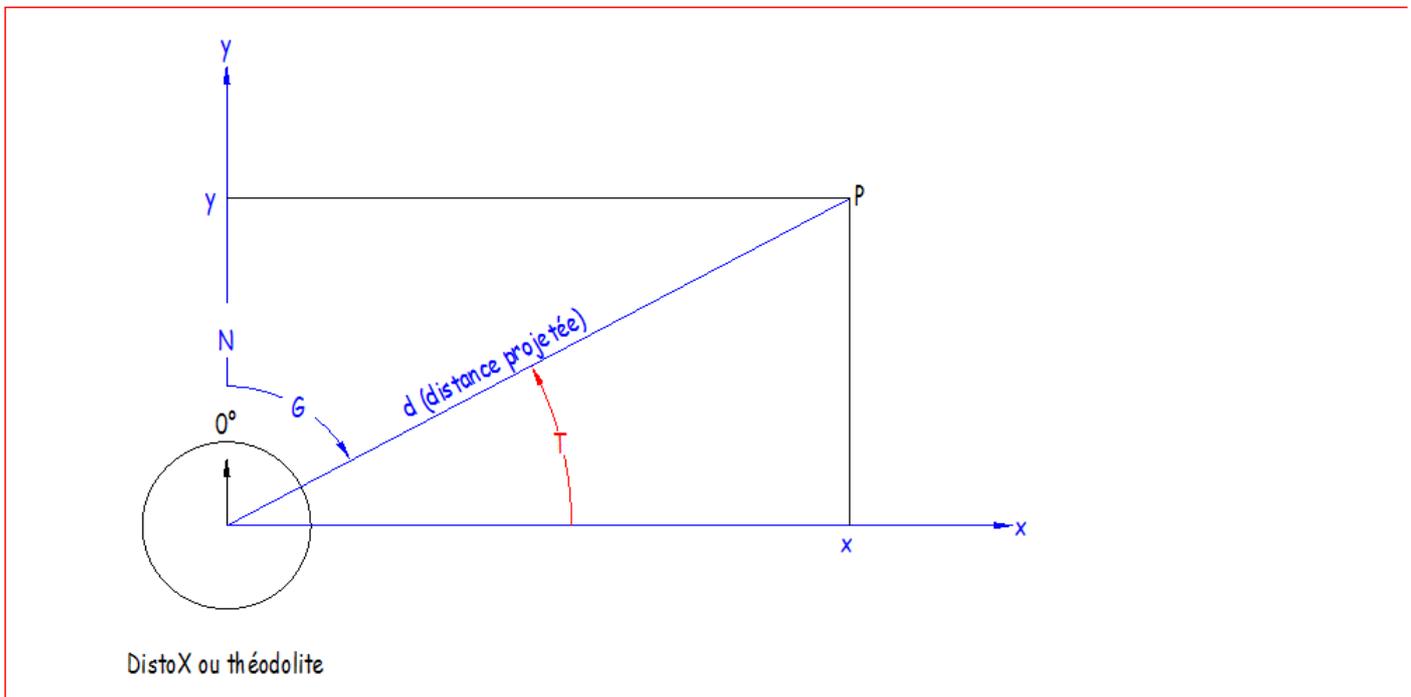


Figure 15 : Projection plane

- L'angle **G** du gisement mesuré par rapport au nord (y) est positif dans le sens des aiguilles d'une montre.
- L'angle **T** trigonométrique mesuré par rapport à x est dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Dans le repère trigonométrique x, y si $G > 0$

$$T - G - \frac{\pi}{2} = 0 \text{ donc } T = G + \frac{\pi}{2}$$

$$x = d \cdot \cos(T)$$

$$y = d \cdot \sin(T)$$

2.7.2.2 Position z

Et puisqu'on va utiliser le dénivelé en mètres calculé et affiché par le DistoX :

z = dénivelé

Pour z , ce devrait donc être simple, mais on verra plus loin au point 5.2 que tout est relatif.

2.7.3 Positions U V W ($x y z$) dans le repère du théodolite

2.7.3.1 Positions théoriques calculées $u v (x y)$

On calcule les coordonnées $x y z$ de la cible dans le repère DistoX et ensuite, on calcule les coordonnées de cette même cible dans le repère théodolite.

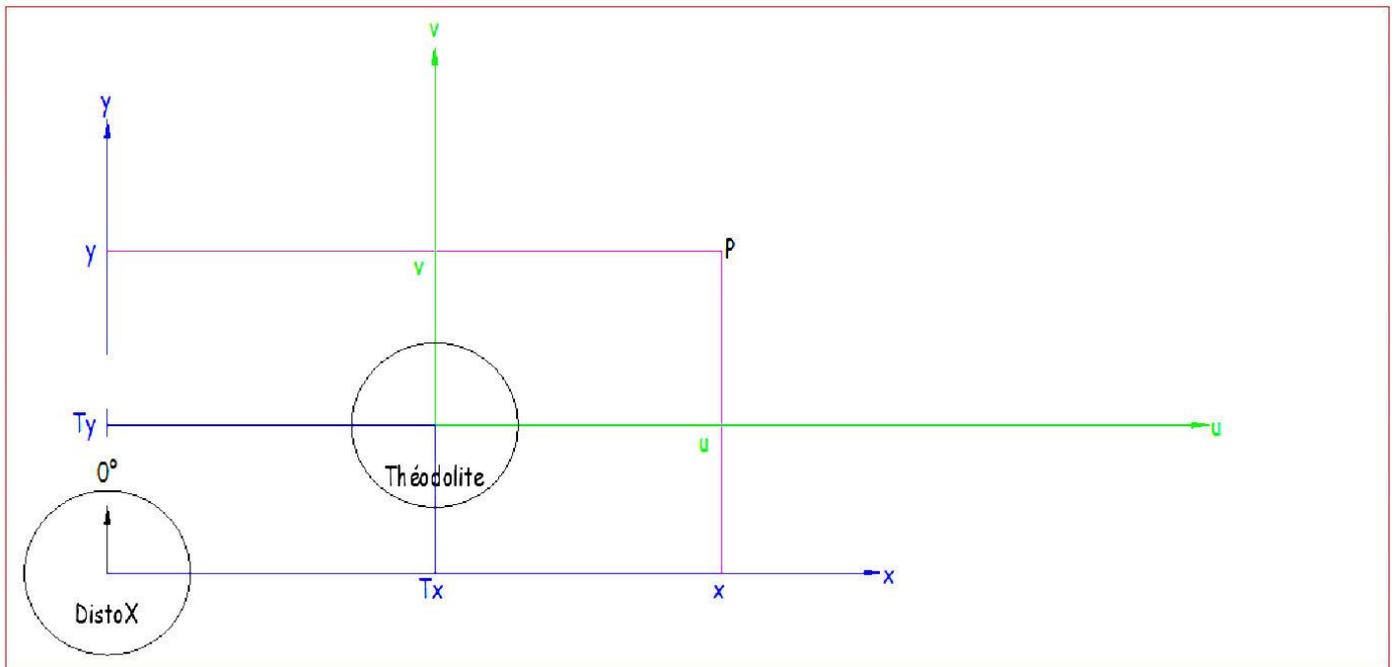


Figure 16 : Changement de coordonnées dans le plan horizontal

T_x et T_y sont les coordonnées du théodolite dans le repère DistoX. Alors les coordonnées de la cible (u, v) dans le repère du théodolite sont :

$$u = x - T_x$$

$$v = y - T_y$$

Par analogie, en s'évitant une figure en 3D :

$$w = z - T_z$$

2.7.3.2 Positions déduites des mesures effectuées par le théodolite

On peut réutiliser la figure 15. (Projection plane) mais cette fois on calcule la distance projetée d et la mesure nous donne G . On va appeler $U V W$ les coordonnées déterminées par la mesure au théodolite.

$$d = \sqrt{u^2 + v^2}$$

$$T = G - \frac{\pi}{2}$$

$$U = d \cdot \cos(T)$$

$$V = d \cdot \sin(T)$$

Il faut être prudent pour la détermination de **W** (*z*) et refaire une figure

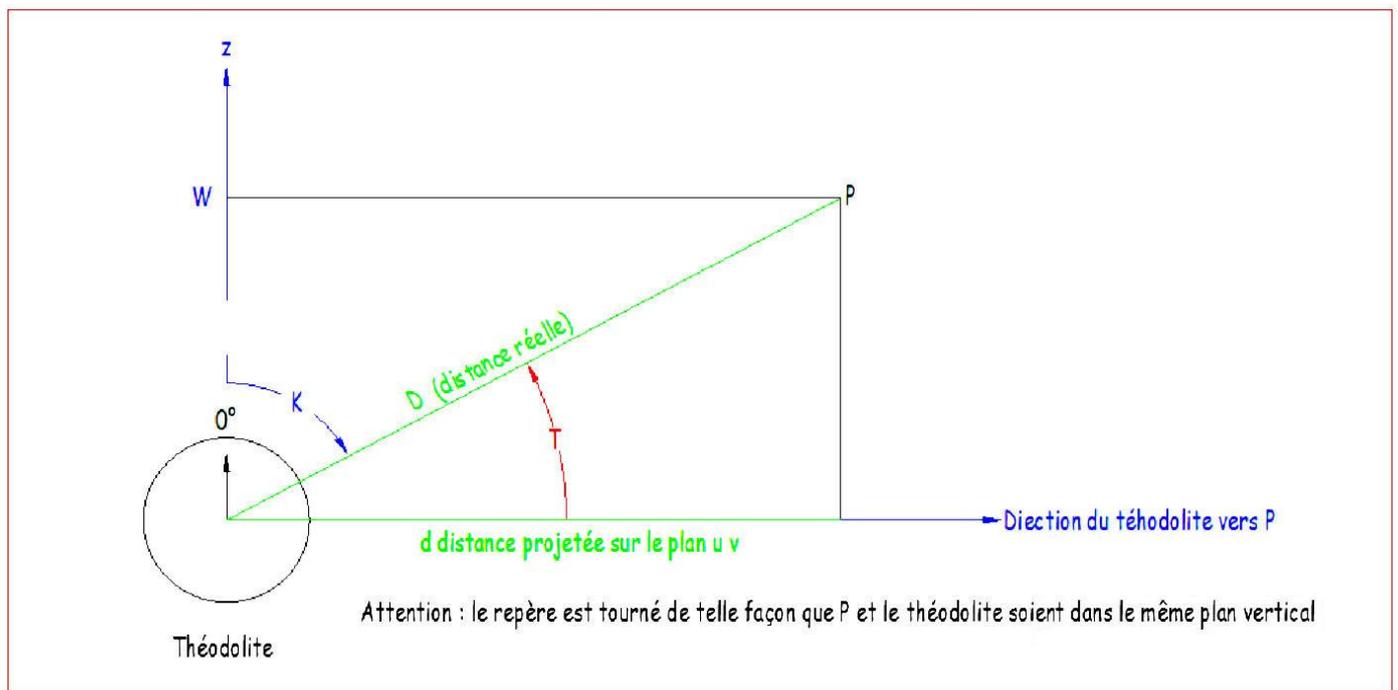


Figure 17 : Détermination de **W** à partir de l'angle zénithal

- **K** est l'angle zénithal mesuré par le théodolite
- **D** la distance, dans l'espace entre le théodolite et le point **P**
- **d** la distance projetée sur le plan *u v* de la distance **D**
- **T** est l'angle d'élévation. Il est plus facile de le déterminer :

$$T = K - \frac{\pi}{2} \text{ (pour } K=90^\circ \text{ on est à l'horizontale)}$$

Comme nous l'avons déjà évoqué, la distance est une distance calculée; elle est considérée comme une constante quand on calcule la position de l'image de **P** donnée par le théodolite. On a à notre disposition deux méthodes possibles :

1) soit $\frac{W}{D} = \cos(k)$

$\cos(k)$ est positif pour $k < 90^\circ$ et négatif quand $k > 90^\circ$

2) soit $\frac{w}{d} = tg(t)$

Comme nous avons déterminé **d** précédemment, nous utiliserons cette dernière.

Donc $w = d.tg(t)$

2.8 ETUDE D'UN TREPIED ADAPTE AU DISTOX

2.8.1 Avant propos

Cette section aurait pu être supprimée de l'article final puisque c'est un autre pied qui sera utilisé le jour de l'expérience, mais le propos reste pertinent pour d'autres expérimentations.

2.8.2 Matériel amagnétique

Comme le champ magnétique terrestre est vraiment faible (47 μ Tesla ou 0.47gauss), nous devons bannir de notre assemblage tout matériau susceptible de perturber les mesures des capteurs du DistoX. Les matériaux choisis ne doivent pas, de plus, conserver une rémanence, même après une exposition à un champ magnétique "intense", lors du transport ou du stockage.

La littérature indique des matériaux utilisables : l'aluminium, le laiton, les polymères, le Phynox, les inox austénitiques, les titanes, le Nivaflex (perméabilité relative < 1.005 μ)

Attention, dans les inox on distingue plusieurs types :

- Austénique : fer-chrome-nickel, carbone < 0,1%, amagnétique à qui représente plus de 65% de l'utilisation d'acier inoxydable
- Ferritique : fer-chrome, carbone < 0,1%, magnétique.
- Martensique : fer-chrome, carbone > 0,1%, magnétique et apte à la trempe.
- Duplex : fer-chrome-nickel, structure mixte austénique-ferritique, magnétique.

Si les bons éviers inox en 18/10 sont amagnétiques, on trouve des couverts, frappés 18/10, qui sont légèrement attirés par un aimant. La visserie Inox en stock à la maison est légèrement attirée par l'aimant. Se méfier donc de l'inox et préférer le laiton ou l'aluminium.

Concernant les aciers inoxydables voir <http://www.visserie-service.fr/plan/VS0109.PDF>

2.8.3 Le trépied photo de François

2.8.3.1 Vue générale de la tête



Figure 18 : Pied König KN-TRIPOD19.

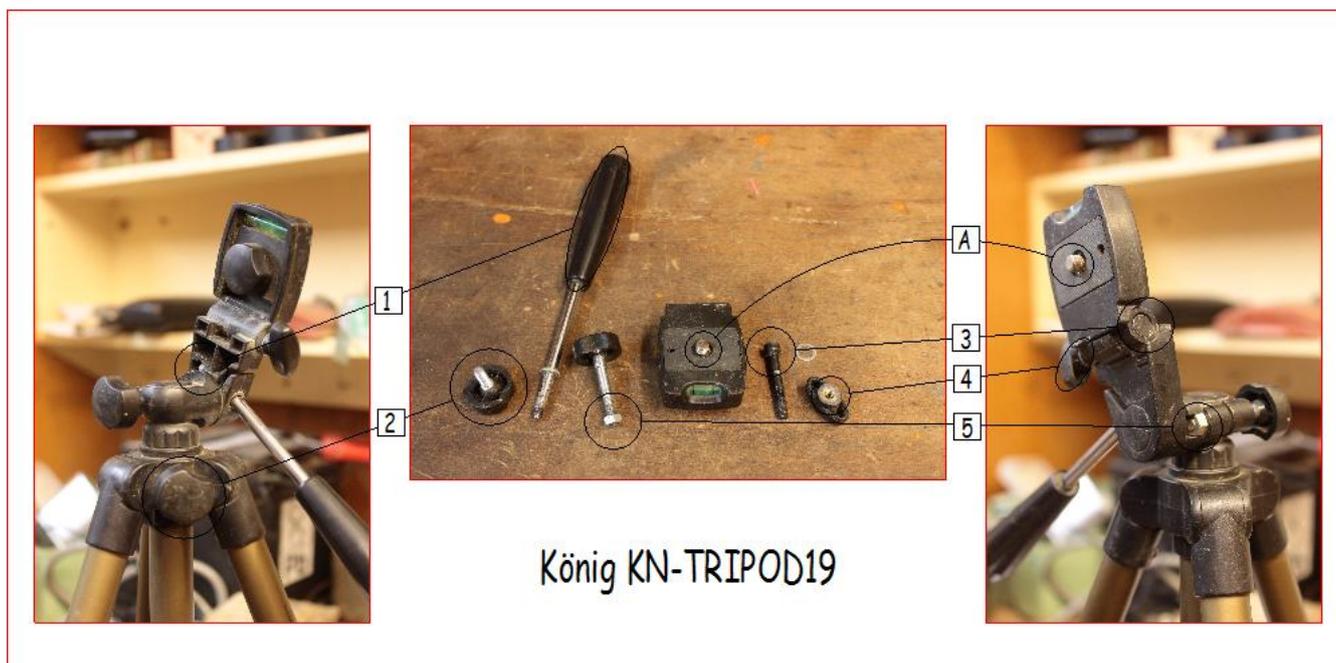


Figure 19 : Visserie de la tête du Pied König KN-TRIPOD19.

Toute la visserie est au pas M5 (sauf la vis A) et en acier. Les diamètres extérieurs mesurés sont :

1. 4,7 mm
2. 4,9 mm
3. 4,8 mm
4. taraudage laiton
5. 4,8 mm

La vis n°3 a une tête spéciale avec deux plats qui bloquent la rotation de la vis.

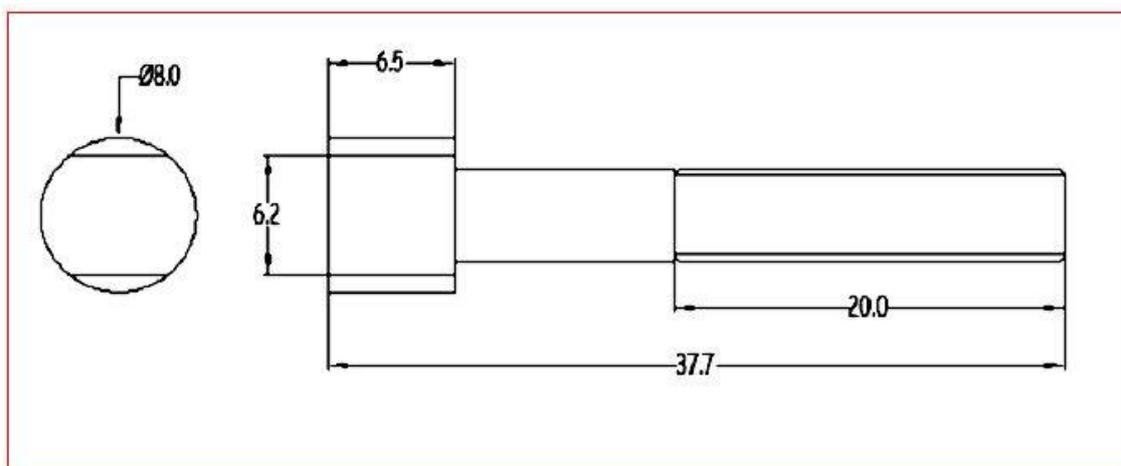


Figure 20 : Vis spéciale n°3.

2.8.3.2 La vis kodak

C'est le taraudage en laiton situé dans la face inférieure des DistoX.

a) Généralités

Dans la littérature on trouve :

- Ø 5,6 mm 1/4" (un quart de pouce)
- 20 filets au pouce
- Profil BSW (British Standard Whitworth)

Le souci c'est que lorsqu'on mesure le diamètre extérieur de la vis on trouve 5,8 mm; ce qui correspond à 0,228 pouce soit 1/439 pouce. Sur un autre pied, de marque Gitaz, on mesure 5,9 mm. Cette vis, solidaire d'un bouton en plastique, est immobilisée sur le dessus par un clip disposé au fond d'un lamage.

Sur le Web, on peut trouver des explications sur ce problème de pas de vis :

<http://alpha-numerique.fr/index.php/materiel/bricolage/987-dans-le-secret-des-filetages-specifiques-aux-trepieds-photo>

*« Tout d'abord, il faut savoir qu'il existe 2 diamètres de vis : un petit (1/4 pouce) qui est utilisé sur les boîtiers (compacts ou reflex, c'est le même) et les supports de flash, et un plus gros (3/8 pouce) qui sert à fixer les rotules sur les trépieds, voire sur les colliers de pied de certains objectifs. Ces deux diamètres sont du même type. Ce n'est ni un pas métrique, ni américain en pouces, c'est un pas anglais quasiment tombé en désuétude, le pas **Whitworth**, qui est encore utilisé en photo, sono (pieds de micro) ou pour la sécurité (axes de manilles impossibles à remplacer par autre chose), et qui était utilisé sur les motos anglaises jusqu'aux années 70. »*

L'angle des filets conditionne leur hauteur (ils seront plus ou moins "pointus"). La différence entre les filetages anglais et américains tient à l'angle des filets : 55° en Angleterre, 60° aux USA, comme pour la norme ISO...

b) Le standard anglais

- **BSW (British Standard Whitworth)** : celui qui nous intéresse, utilisé en photo.
- **BSF (British Standard Fine)** : angle de 55° également, mais espacement plus faible. Totalement incompatible.
- **BSC (British Standard Cycle)** : angle de 60°, espacement des filets beaucoup plus faible. Totalement incompatible.

c) Le standard US

- **UNC (Unified National Coarse)** : angle de 60° au lieu de 55°, mais espacement de filets identique au BSW. Par les tolérances, peut être compatible avec le BSW, mais pas parfaitement ajusté.
- **UNF (UN Fine)** : espacement fin, incompatible.
- **UNEF (UN Extra Fine)** : encore plus fin, incompatible.
- **UNS (UN Special)** : pas spéciaux.

d) Comment identifier la visserie au pas Kodak ?

En anglais, cherchez "BSW bolts" et "BSW screws" pour les différents types de vis, éventuellement "BSW nuts" pour les écrous. Chez de nombreux vendeurs les UN* et BS* sont regroupés sous la dénomination "imperial" (en opposition à "metric"). On cherchera alors dans les spécifications précises les vis BSW, selon diamètre, pas (TPI) et angle... En anglais taraud se dit "Tap", et filière "Die". Pour un taraud Whitworth 1/4 pouce on cherchera donc : 1/4" BSW tap. Sur internet ce matériel se trouve facilement, mais seulement en cherchant en anglais... Une filière 1/4 pouce sera : 1/4" BSW die (filetage théorique sur axe de 6.16 mm)

Nota :

Les vis 1/4" et 3/8" UNC, beaucoup plus faciles à trouver que les BSW, **peuvent** se monter sans risque de grippage car les filetages sont très courts en photo. Les tolérances de jeu font donc que le montage est possible, mais l'ajustement ne sera pas parfait.

Dernier point : le perçage. Là aussi, dans la mesure où on sort du système métrique, il est très difficile de savoir quel diamètre de trou percer avant taraudage :

- 1/4" : perçage en 5.1 mm (en anglais foret "Number Drill 9").

Attention : On peut trouver sur le Web des propositions de ce type,

https://www.pierro-astro.com/materiel-astronomique/visserie-et-fixations/visserie-inox-filetage-americain-type-kodak-1-4-x20_detail

« Visserie INOX filetage américain type Kodak 1/4"x20 Ces vis servent généralement à fixer un appareil photo sur un télescope (compatible avec le filetage présent sous la plupart des appareils photo du marché) »

Ce ne sont pas des vis Kodak, même si le montage est peut-être envisageable.

e) Historique et usage du **Filetage Whitworth**

Ce filetage dont les pas sont conçus en pouces porte le nom de son inventeur Sir Joseph Whitworth. C'est le premier filetage normalisé au monde. Le filetage Whitworth est aujourd'hui souvent utilisé pour la tuyauterie. Il est aussi appelé, dans le langage courant, filetage gaz. À la différence du filetage métrique normalisé, l'angle des filets est ici de 55 ° et le pas est exprimé en pouces. Pour simplifier le tout, le filetage normalisé Whitworth britannique existe en deux versions : le BSW (British Standard Whitworth) à pas standard et le BSF (British Standard Fine Thread) à pas fin.

2.8.4 Problèmes posés par la tête supportant le DistoX

2.8.4.1 Problématique

Le théodolite présente une articulation quasi parfaite. Les axes de rotation en site et en azimut se croisent au centre optique de la lunette de visée, il n'en est pas de même pour le pied photo supportant le DistoX. On l'a dit, la position du centre de mesure du DistoX n'a pas été identifiée; on va supposer qu'il se situe à la verticale du taraudage de fixation sur le pied et au milieu de l'épaisseur du DistoX. La feuille de calcul va prendre en compte, séparément, deux phénomènes :

- le placement, dans le plan horizontal du centre du DistoX par rapport à l'axe de rotation en azimut du pied (axe de rotation principal vertical du pied),
- le placement, dans le plan vertical du centre du DistoX par rapport à l'axe de rotation en site de la tête du pied (axe de rotation horizontal de la tête).

2.8.4.2 Orientation en site du DistoX

L'axe de rotation horizontal, celui qui permet d'orienter les DistoX en site, ne passe pas par l'axe du DistoX. On voit sur le croquis ci-après le mouvement induit. Un exemple numérique (en mm) est montré quand le DistoX est à son site maximum compatible avec le théodolite. Le niveau en z est peu affecté, mais dans le plan horizontal la distance n'est pas négligeable.

La « taille » d'une cible distante de 20 m avec une précision de 1% est de 200 mm et ici (voir schéma ci-après) la distance entre l'axe de rotation et le centre supposé du DistoX est de 30 mm : ce n'est donc pas anodin. Par conséquent il faut, en toute logique, corriger la position du centre du DistoX quand celui-ci est incliné²⁴. Le pied König KN-TRIPOD19 décale le DistoX de 66.0 mm; peut-être que d'autres pieds le décaleraient moins. En tout cas, ça montre qu'il ne faut pas éloigner le DistoX de la tête du pied avec une cale qui augmenterait encore le phénomène. La correction risque de ne pas prendre en compte une cale trop importante²⁵.

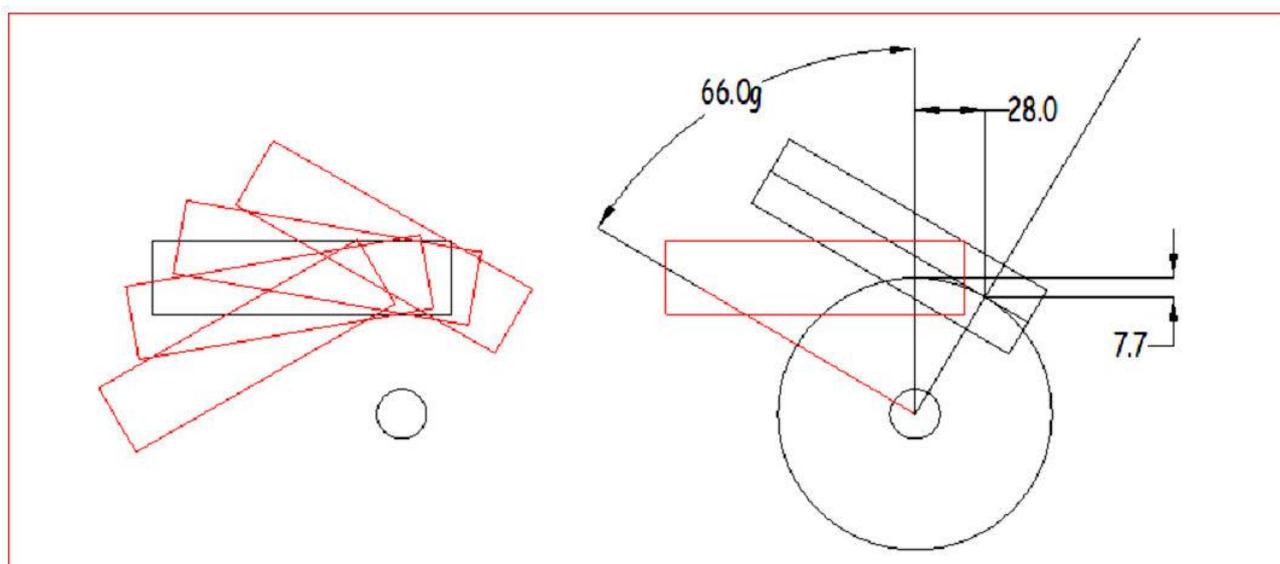


Figure 21 : Problème posé par la rotation en site de la tête.

²⁴ Cela n'a pas simplifié les formules.

²⁵ En réalité, Dom pour résoudre le problème du magnétisme du pied devra utiliser une longue entretoise entre la table supérieure du pied et le taraudage du DistoX2 (cette correction de détail sera donc finalement très sollicitée). Voir au point 4.

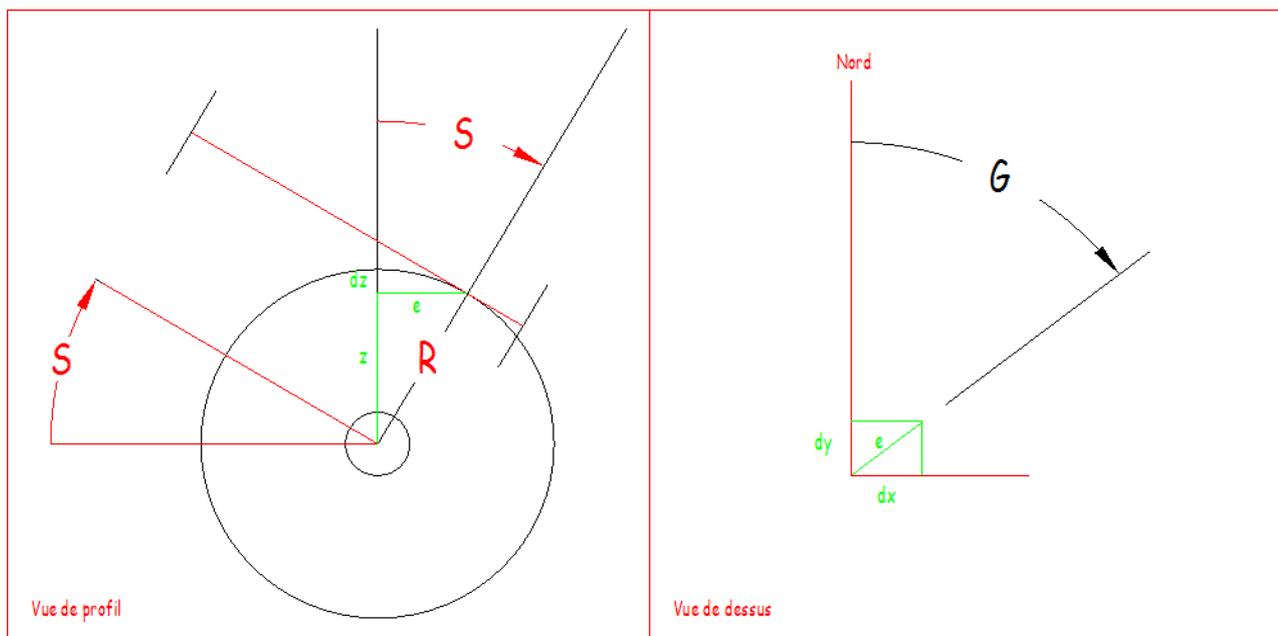


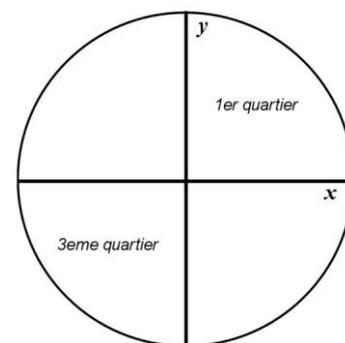
Figure 22 : Détail de la rotation en site de la tête

La figure de profil (à gauche) est dans un plan vertical dans l'axe de visée du DistoX. On va déterminer dz , la modification de hauteur, directement. On va calculer e qui est aussi dans ce plan. La vue de dessus (à droite) montre la projection de e sur les axes x et y en fonction de l'angle de gisement G de la visée pour déterminer dx et dy . On va utiliser l'angle d'élévation S (angle de site).

$$\frac{e}{R} = \sin(-S) \rightarrow e = R \cdot \sin(-S)$$

On écrit $-S$ de telle façon que, à site positif, quand on vise au-dessus de l'horizontale, la cible étant dans le premier quartier du repère orthonormé, e soit négatif comme si l'origine du repère se déplaçait dans le 3^{ème} quartier. On vérifiera la cohérence de cette écriture à la fin, avec un tableau numérique.

$$\frac{z}{R} = \cos(S) \rightarrow z = R \cdot \cos(S) \rightarrow dz = R(1 - \cos(S))$$



On voit que dz est toujours positif. La nouvelle coordonnée verticale z_c d'un point z_0 sera donc

$$z_c = z_0 - R(1 - \cos(S))$$

Dans la projection horizontale (vue de dessus) :

$$dy = e \cdot \cos(G) \text{ et } dx = e \cdot \sin(G)$$

dx et dy sont à compter positivement si $S < 0$ et $G \in]0, 90^\circ[$

$$x_c = x_0 + e.\sin(G)$$

$$y_c = y_0 + e.\cos(G)$$

Nous avons établi que $e = R.\sin(-S)$ donc

$$x_c = x_0 + R.\sin(-S).\sin(G)$$

$$y_c = y_0 + R.\sin(-S).\cos(G)$$

$$z_c = z_0 - R(1 - \cos(S))$$

- **R** est la distance entre l'axe d'orientation en site et le centre du DistoX, positif dans le cas général où le DistoX est au-dessus de cet axe.
- **S** est l'angle de site, il est positif si on vise au-dessus de l'horizon.
- **G** est le gisement mesuré, compté à partir du nord (axe des y), dans le sens des aiguilles d'une montre.
- $x_0 y_0 z_0$ sont les coordonnées du point, telles qu'elles ressortent du calcul à partir de la distance et de l'élévation mesurées sur le DistoX.
- $x_c y_c z_c$ sont les coordonnées corrigées, tenant compte de l'inclinaison du DistoX. Ce sont donc les vraies coordonnées de la cible dans le repère du DistoX.

Une vérification avec une figure construite dans l'espace avec DraftSight a permis de contrôler l'intégration de ces formules dans la feuille de calcul Excel.

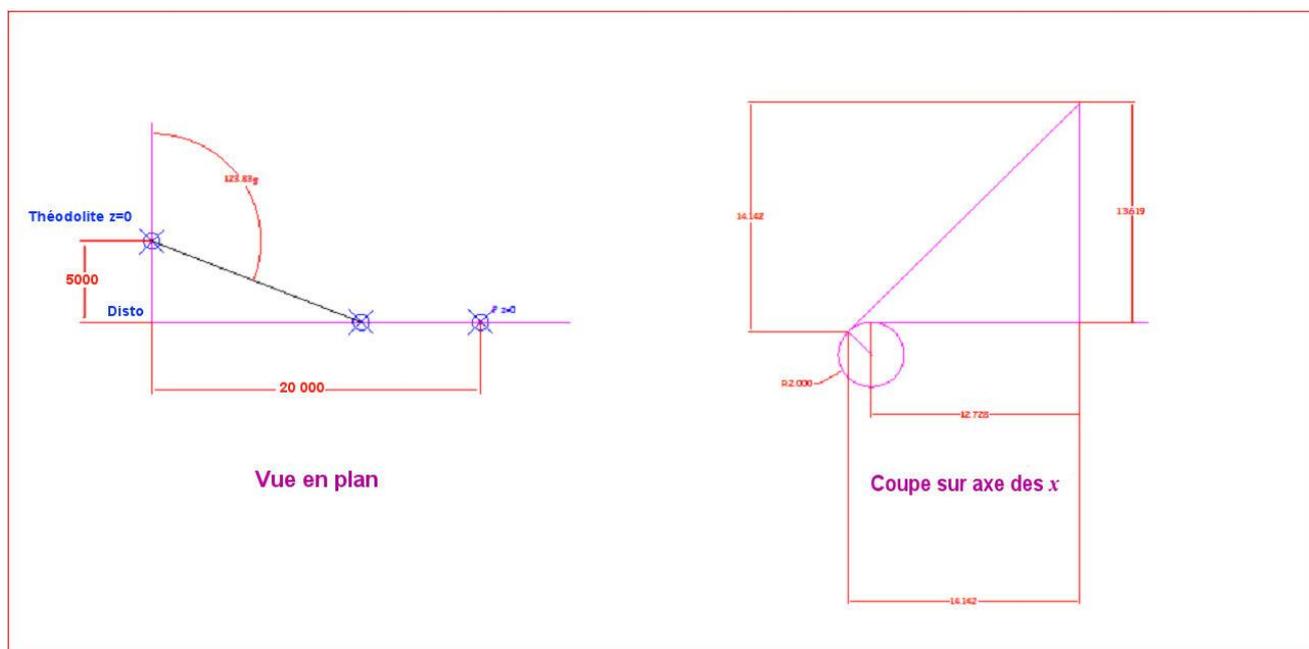


Figure 23 : Exemple de vérification dans DraftSight

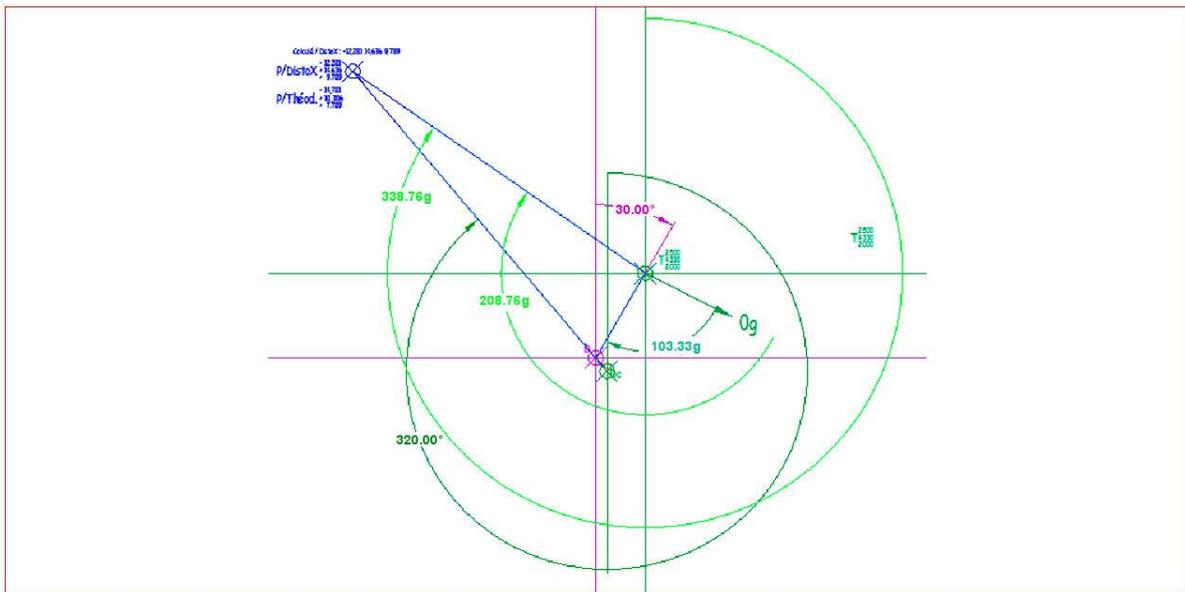


Figure 24 : Exemple d'une vérification numérique dans un cas quelconque

On remarquera la facilité qu'offrent des outils de traçage en 3D (comme DraftSight ou AutoCad) pour modéliser une expérimentation, faire les constructions géométriques et vérifier, en lisant les longueurs géométriques dans l'outil, que les valeurs calculées algébriquement sont bonnes.

2.8.4.3 Position du centre de mesure du DistoX

Le DistoX permet de choisir à partir d'où la distance affichée est mesurée. Nous choisirons de conserver le paramétrage par défaut : sur la base arrière du DistoX. Le montage sur la tête du pied photo permet de mesurer (avec un réglet) la distance entre la partie arrière du DistoX et l'axe de rotation du pied. On l'appellera le « Talon » et il est compté positif dans le sens de la figure.

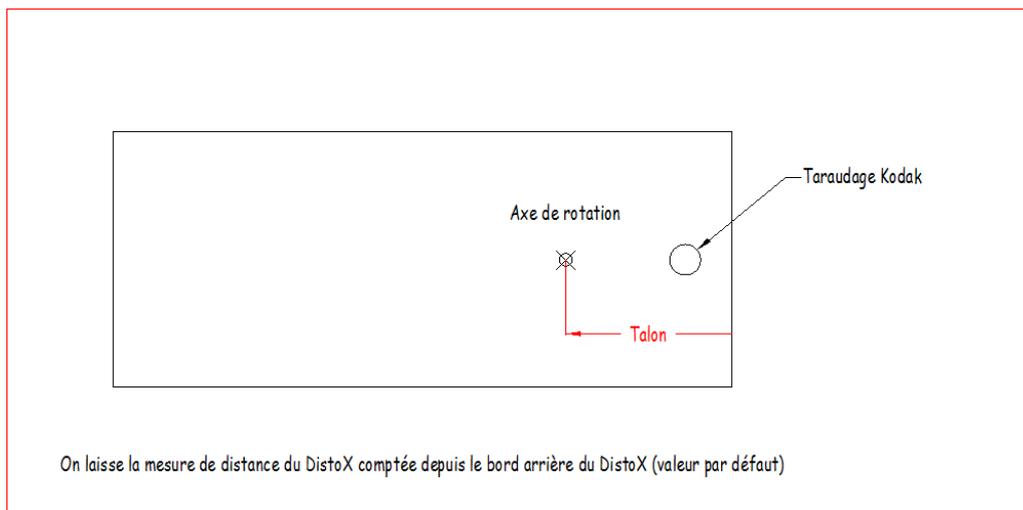


Figure 25 : Axe de rotation du DistoX

Si on prenait en compte la distance optique réelle (non horizontale), il suffirait de retirer ce talon pour la prise en compte de la mesure. Mais nous utiliserons la distance projetée sur le plan horizontal. Il faut donc adapter la correction en fonction de l'angle de site. Ce n'est pas très compliqué :

$correction = Talon.cos(angle\ de\ site)$ Évidemment le classeur Excel intègre cette *correction*.

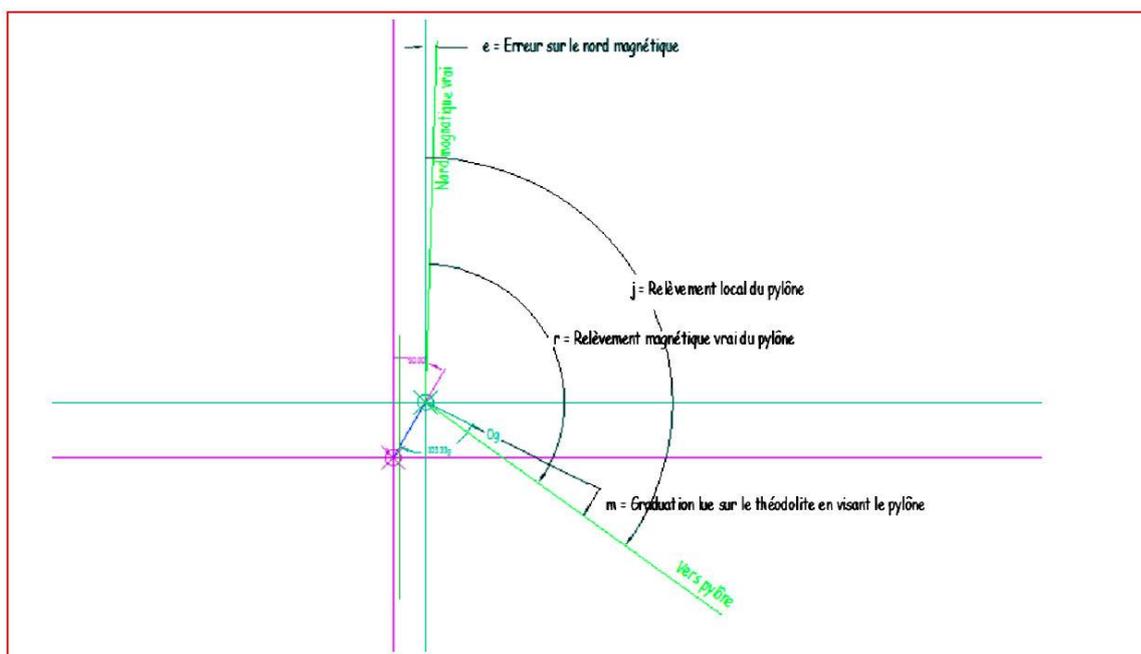
2.8.4.4 Correction du compas

La feuille de calcul permet d'évaluer un DistoX d'origine, n'intégrant pas une carte compas magnétique. Le relèvement, dans ce cas, s'effectue avec un compas magnétique à main. La feuille de calcul permet d'intégrer les paramètres d'étalonnage de ce compas²⁶.

2.9 ÉTALONNAGE DU NORD VRAI

En particulier lors d'une campagne de mesures en surface (à plat dans un pré), il est peut-être possible de relever la direction d'un objet terrestre lointain (un pylône, une tour etc.). Avec la feuille de calcul *Gps.xls* et la position Longitude / Latitude du théodolite et de l'objet, on calcule la direction (le relèvement) vrai de l'objet par rapport, a priori, au nord WGS84. *Gps.xls*²⁷ n'accepte que des degrés - minutes - secondes et donne des degrés décimaux. Avec *DecliMag*²⁸ (qui supporte les degrés décimaux) on récupère la déclinaison magnétique du lieu et du moment. En France, et pour longtemps, le nord magnétique est à l'Est du nord géographique.

$r = \text{Relèvement magnétique} = \text{Relèvement géographique} - | \text{déclinaison} |$



²⁶ Voir les documents d'évaluation d'un compas IRIS 50, par François Marchand, disponibles sur : http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/analyse_des_compas.pdf et http://souterweb.free.fr/boitaoutils/prospection/annexes/etalonnage_compas.xls

²⁷ Les onglets de *GPX.xls* ont été intégrés dans le classeur de calcul et les valeurs des coordonnées sont à entrer en degrés décimaux WGS84 dans l'onglet "Nord vrai".

²⁸ Voir sur : <http://vtopo.free.fr/declimag.htm>

Figure 26 : Étalonnage du Nord vrai

En se reportant au 2.3.1.3

$j = m + X$ L'erreur est donc $e = j - r$ Elle est positive si le nord vrai est à l'Est du Nord magnétique du DistoX.

3 QUEL LIEU IDÉAL POUR CETTE EXPÉRIENCE ?

3.1 PRESENTATION

Notre première expérience de comparaison entre ces deux types d'appareils de topographie s'était déroulée le 20 mai 2017 au « Col de Thalys » (altitude 913 mètres, commune de Mélagues) dans le sud de l'Aveyron au-dessus de Graissessac. Dans le compte-rendu de celle-ci, François précisait en conclusion : « *Par contre, si on voulait renouveler l'expérience en l'améliorant, on pourrait envisager un site souterrain avec une grande salle pas trop éloignée de l'entrée car il faut transporter le théodolite. [...] Il serait nécessaire de démêler tous les calculs de parallaxe ou de changement de repère [...] On obtiendrait alors un nuage de points qui permettrait une évaluation...* » (voir le compte-rendu sur Souterweb²⁹).

En conséquence, il devenait nécessaire de dénicher un lieu adéquat qui réponde au cahier des charges suivant :

- obscurité relative afin d'éviter les problèmes de lumière parasite qui avait invalidé de nombreuses mesures au col de Thalys en plein soleil,
- volume assez vaste permettant faire des visées à 360° et avec des points hauts et bas pour varier les visées en site positif ou négatif (voir 2.6.2),
- environnement proche de la station de travail peu perturbateur d'un point de vue électromagnétique.

Nous avons d'abord pensé à une église. Mais nos recherches dans la zone géographique du Gard ou du Sud Lozère avec l'aide de quelques collègues spéléologues du secteur (merci Michel) ne nous ont pas permis de dénicher la perle rare. Une grotte était aussi un lieu propice, ça tombe sous le sens. Il fallait pourtant qu'elle soit facile d'accès à cause de tout le matériel qu'il y avait à transporter et installer ; ce serait donc une cavité aménagée. Encore fallait-il obtenir l'autorisation d'y travailler pendant les horaires de visites.

Dans le Gard, deux grottes visitables semblaient compatibles : la Salamandre et la Cocalière³⁰. C'est grâce à un contact obtenu par Pascal Moinard que nous obtiendrons le feu vert pour aller

²⁹ Le compte-rendu de la première expérience au Col de Thalys se trouve à l'adresse : <http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/pages/disto.htm#precision>

³⁰ Ayant obtenu l'autorisation de travailler à la Salamandre, aucune démarche en ce sens n'a finalement été faite pour accéder à la grotte de la Cocalière.

nous installer le mardi 29 mai à la Salamandre. Au final, ce lieu s'avèrera idéal pour ce que nous avons envisagé de faire.

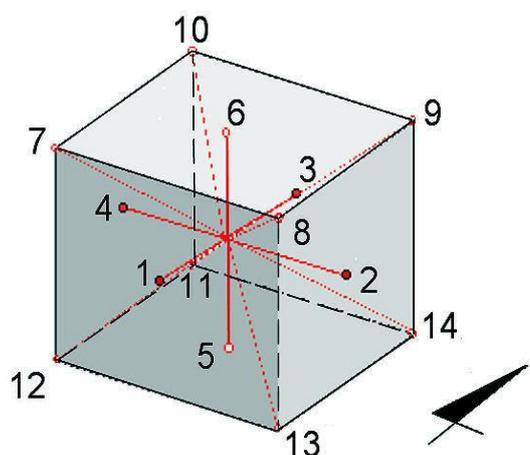
3.2 DIFFICULTES DE MISE EN ŒUVRE

3.2.1 Pour le théodolite

Si les graduations du limbe sont parfaitement visibles dans l'obscurité du fait de leur éclairage par une LED rouge interne, il n'en va pas de même du réticule (la croix servant de viseur dans la lunette). Il faut donc que le fond soit quelque peu éclairé. Même chose pour l'usage du chercheur qui va être indispensable pour faire *entrer* le spot dans la lunette.

Ce problème, du fait de l'éclairage artificiel permanent mais mouvant de la grotte, ne nous a pas trop gênés.

3.2.2 Pour les DistoX³¹



Les 14 points visés lors de l'étalonnage d'un DistoX.

(d'après Marco Corvi)

L'an dernier, au col de Thalys et suite à des ennuis techniques de dernière minute (voir compte-rendu sur Souterweb³²) nous n'avions pas pu évaluer la précision du DistoX2 car il n'avait pas été préalablement étalonné et ses données étaient très mauvaises. Pour cette nouvelle tentative, le souci était donc d'obtenir un ou plusieurs DistoX étalonnés récemment et de façon similaire ; c'est-à-dire selon la même procédure, par le même opérateur, le même jour et au même endroit.

Le lieu d'étalonnage étant au moins aussi important que la méticulosité de la procédure, il fallait trouver un espace s'approchant le plus possible du cube théorique (illustration ci-contre) et hors de toute perturbation électromagnétique. Les deux appareils ont donc été étalonnés à la tour médiévale de

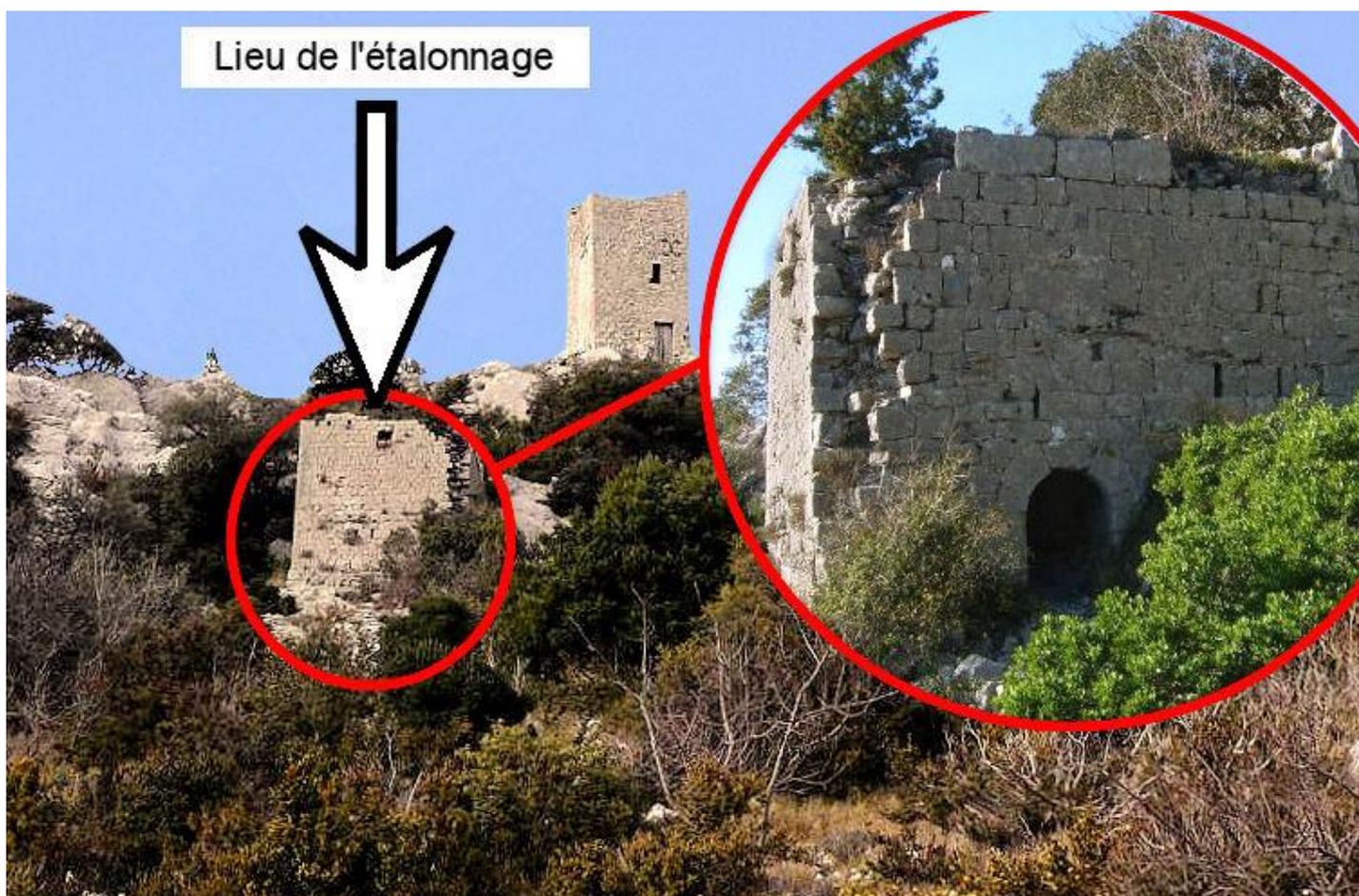
Cazevieille, au nord de Montpellier, qui a l'avantage de présenter une salle carrée avec une voûte quasi complète en pierres sèches très loin de tout métal ou ligne électrique. De plus, son sol rocheux irrégulier permet de se surélever assez aisément au centre de la pièce pour les visées à site négatif : en bref, c'est l'endroit rêvé pour cette manipulation. Les étalonnages ont donc été faits là, quelques jours avant l'expérimentation.

³¹ Attention : ici et dans ce qui suivra, contrairement au début de l'article, le terme « DistoX » désigne le modèle modifié pour la topographie spéléo.

³² Le compte-rendu de la première expérience au Col de Thalys se trouve à l'adresse :

<http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/pages/disto.htm#precision>

Après étalonnage une vérification sera effectuée par une mesure aller-retour avec roulis ainsi qu'une boucle carrée à l'intérieur de la tour. Les résultats satisfaisants et surtout bien meilleurs qu'avant l'étalonnage (ainsi que l'examen du coefficient obtenu suite au traitement des 56 visées d'étalonnage par les logiciels TopoDroid et PocketTopo) confirmeront que la procédure s'est déroulée correctement. En réalité, un des deux étalonnages est nettement meilleur que l'autre. Il me semble que pour avoir des éléments de comparaison, cette situation est préférable à une stricte égalité sur les deux appareils : en conséquence j'en resterai là. Pour autant demeure une question non élucidée : pourquoi ces deux modèles d'appareils similaires et traités dans des conditions strictement identiques, n'ont-ils pas atteint la même qualité d'étalonnage (voir une amorce de réponse au 6.4.2) ?



La tour médiévale inférieure de Cazevieuille (34).

Mais tout le monde ne pouvant pas disposer d'une tour médiévale, comment simplifier la procédure pour l'appliquer ailleurs avec autant voire plus de succès ?

Il faut savoir tout d'abord que ce sont les $4 \times 4 = 16$ premières visées qui sont primordiales (les visées horizontales) et que dans tous les cas, la position centrale de l'opérateur n'est pas indispensable. Si on nomme « P » le point central du cube virtuel, qui pourrait être le centre de la salle en pratique, les quatre fois quatre premières visées pourraient être P>1, P>2, P>3 et P>4. Mais comme au cours du processus d'étalonnage le DistoX2 ne mesure pas les longueurs mais uniquement les azimuts et les pentes, il est possible de remplacer ces 4×4 visés par 1>3, 3<1, 2>4 et 4>2. Dans ce cas précis cela permet de s'appuyer sur le mur pour pointer le mur opposé et

d'être donc plus précis ; car l'important est de bien viser le même point tout en respectant au mieux le roulis.

De plus, il n'est pas indispensable avec le nouveau modèle de Disto (basé sur le X310) d'avoir un obstacle vers le haut pour la visée vers le point 6 du cube virtuel. Il est tout à fait possible de poser le distancemètre au sol sur une surface plane et de pointer le ciel pour ces quatre visées verticales. On peut par exemple utiliser une petite plaque de bois carrée aux médiatrices tracées pour y matérialiser l'axe de roulis et poser le DistoX dessus au centre. Idem pour les quatre visées verticales (vers le point 5 du cube virtuel) : inutile de soulever le DistoX qui peut rester sur cette plaque plane et horizontale.

Voilà qui simplifie énormément les 24 premières mesures et permet d'étalonner par exemple dans un bosquet avec quatre beaux arbres en carré qui peuvent remplacer les quatre murs de la salle et le ciel au-dessus à la place de la voûte. Le résultat sera aussi bon si vous prenez la précaution de ne pas étalonner en plein soleil, l'été à midi, où la luminosité va vous gêner pour distinguer le laser.

Une dernière petite chose à laquelle il faut penser pour améliorer le résultat de l'étalonnage c'est de tester l'algorithme NL (Non Linéaire) qui a été ajouté après les premières années d'utilisation des logiciels de topographie comme PocketTopo ou TopoDroid. Cette option permet de compenser un éventuel problème de non-linéarité des capteurs d'accélération (en plus des soucis liés à l'alignement du laser, au magnétisme, ou à l'électronique). Il est toujours possible de recalculer les coefficients d'étalonnage en position NL sans refaire les visées ; si ce second calcul donne de meilleurs résultats que le précédent, alors utiliser ces nouveaux coefficients pour les exporter vers le DistoX. Attention : on ne peut pas utiliser l'option "NL" sur un DistoX1 dont le firmware est antérieur à la version 2.3 !

4 LE MATÉRIEL UTILISÉ

4.1 PREPARATIFS

En dehors du fatras habituel pour une journée sous terre (thermos de chocolat chaud, casse-croûte, tenue spéléo, casque et éclairage) il va nous falloir réunir tout un tas de matériel plus ou moins technique.

François apporte son théodolite muni de son gros tripode en alu et son enregistreur audio numérique. De mon côté je me charge des DistoX et du matériel de saisie des données.

Pour pouvoir utiliser le DistoX, le premier travail consiste à acheter un pied photo léger le moins ferreux possible, puis de le modifier pour le rendre inerte pour le DistoX. Il s'agira d'un trépied photo bas de gamme de marque König KN-TRIPOD30N essentiellement en aluminium et plastique. Dans la tête orientable du pied, il me faudra remplacer plusieurs vis acier par des vis en laiton, mais ce ne sera pas suffisant pour le rendre parfaitement amagnétique car il reste quelques petites parties ferreuses (probablement



La table alu du pied de théodolite.

incorporées au plastique et impossible à enlever). La démarche est identique à celle que François a détaillée au point 2.8.3.

Après avoir fait plusieurs essais, je constate que si j'éloigne le Disto de 5 cm ou plus de la tête du pied, celui-ci n'influence plus les mesures d'azimut. Je vais donc me mettre en quête d'un support amagnétique verrouillable sur la tête orientable du pied et mesurant plus de 5 cm de longueur pour avoir de la marge. C'est Dominique Lacroix, un ami spéléo gardois dentiste de son état, qui va me dépanner grâce à un support en inox destiné à l'origine à une machine de nettoyage par ultrasons. En lui ajoutant deux adaptateurs de vis de trépied photo 1/4" en aluminium pour sabot d'appareil photo, je pourrai monter cette rallonge amagnétique sur la tête de pied et ainsi fixer solidement le Disto hors de la zone perturbatrice. Bien que doublée avec de la plaque d'aluminium, cette pièce n'est pas encore suffisamment rigide, mais le retardateur du Disto permettra de donner le temps à la visée de se stabiliser. Cette pièce entraînera des corrections sur les mesures effectuées dont tient compte la feuille Excel de François (voir 2.8.4.2).

Ensuite je me mets en quête de plusieurs distancemètres. « Spéléo échaudé craint l'eau froide » (voir CR de l'expérience précédente) ; cette fois pas question de prendre le risque de devoir improviser au dernier moment. Nous prendrons donc le DistoX2 de Dominique Ros, le DistoX2 que nous prête gentiment Jean-Michel Salmon du SCM et Jean-Pierre Rouges, appelé à l'aide à l'improviste, amènera aussi le DistoX1 du CLPA au cas où. Là, nous devrions être prêts à toute éventualité.

4.2 LE MATERIEL DISPONIBLE

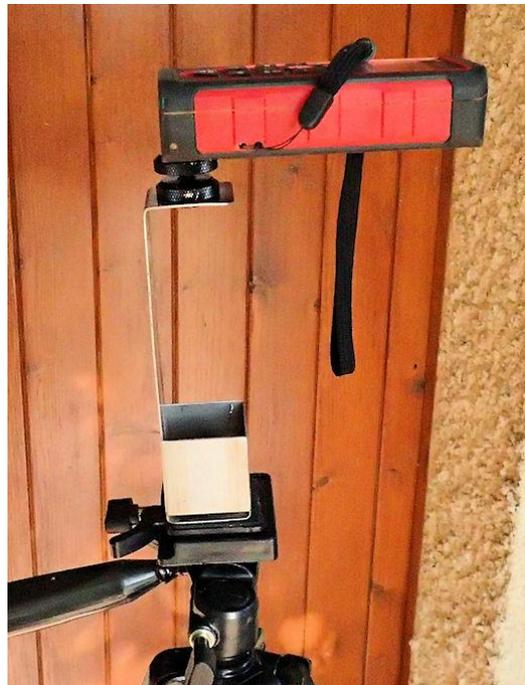
- Deux distancemètres Leica X310 modifiés, un distancemètre Leica Disto A3 modifié et un théodolite Wild Heerbrugg T05 monté sur tripode et équipé de l'option plomb optique (voir aussi 2.3.2.2).



- Un PC portable Toshiba TECRA S11, une tablette ALGATEL one Touch 18 pouces et un enregistreur numérique Olympus DS-40.

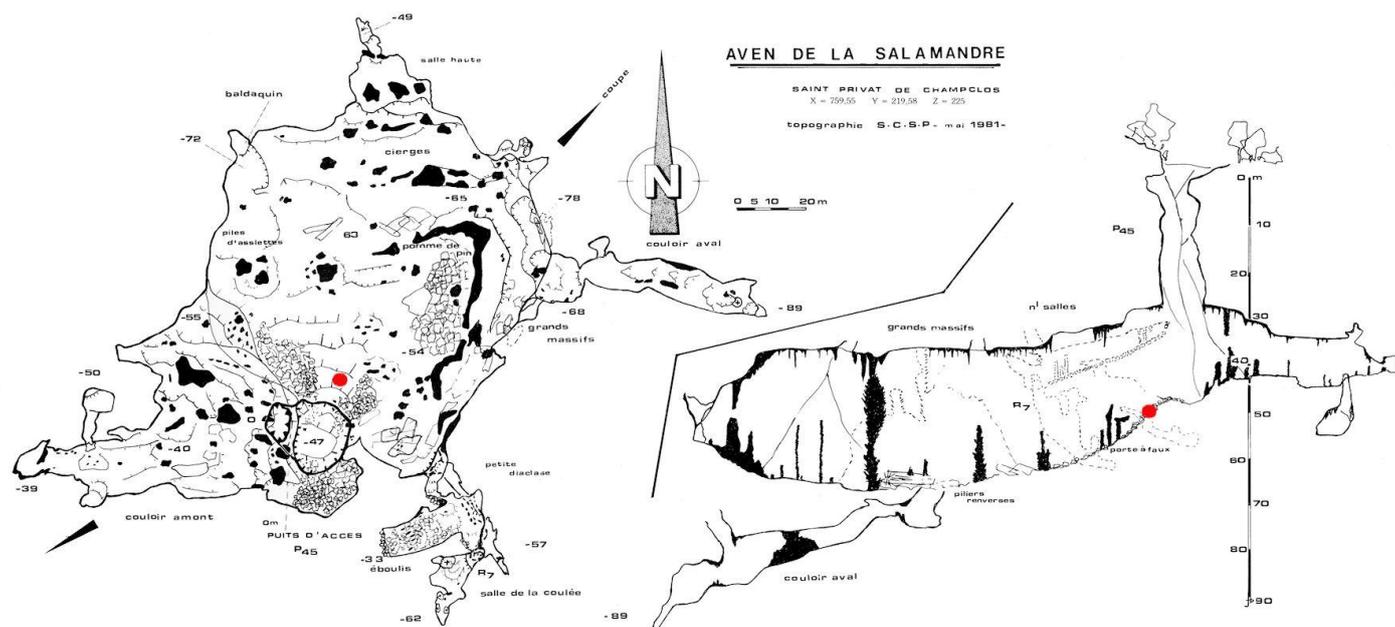


- Un niveau à bulle amagnétique (en plastique) et un pied photo (König KN-TRIPOD30N) modifié avec sa rallonge amagnétique (inox + alu) légèrement différent de celui décrit au 2.8.3.



5 EXPÉRImentation À LA SALAMANDRE

5.1 Accueil et installation



Topographie de la Salamandre (SCSP Alès), le point rouge indique notre position approximative.

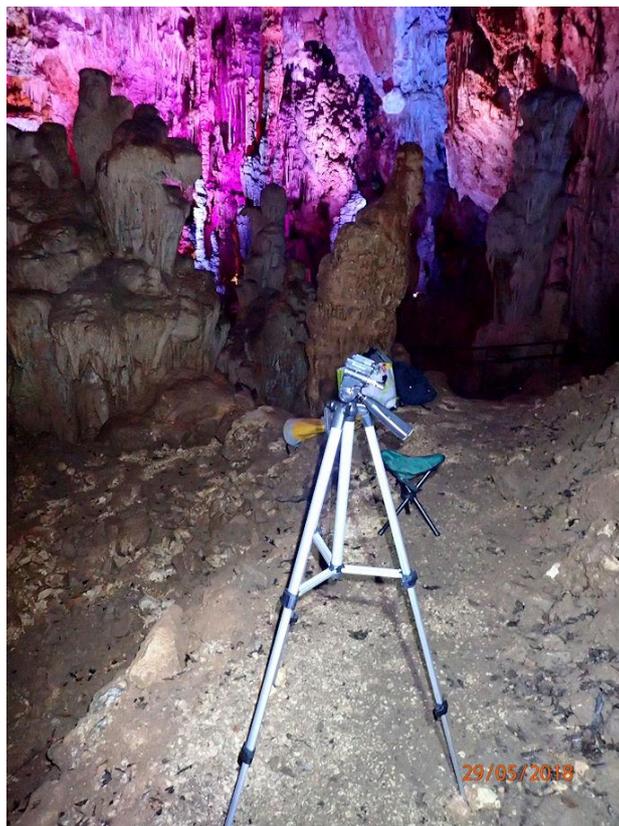
Comme convenu avec Bérénice Berthelot par SMS, nous devons arriver sur place assez tôt pour avoir le temps de nous installer avant 10 heures, heure à laquelle la cavité ouvre au public. Nous décidons donc de nous retrouver à l'entrée du parking visiteurs à 9h pour ensuite acheminer le matériel par l'entrée des fournisseurs, tout près des tunnels d'accès et de sortie de la grande salle.

François est déjà là quand nous arrivons de Montpellier et nous faisons tous les trois le tour de la colline pour nous garer dans le dernier virage en vue de la Cèze. Bérénice arrive peu après et nous ouvre le portail ; nous pourrons ainsi garer les véhicules à quelques pas de l'entrée ce qui facilitera grandement le transport de tout notre bardas. Après ce sympathique accueil, nous enfilons une tenue spéléo et chargés comme des mulets nous dirigeons vers le sas du tunnel d'accès.

Il faut bien l'avouer maintenant, nous avons tous les trois – même si on ne le dit pas sur le moment – une petite appréhension. Comme nous sommes descendus dans la cavité plusieurs fois bien avant son aménagement, nous nous demandons ce que nous allons découvrir. Pour Dominique, la Salamandre a même été la toute première grande salle souterraine qu'il a explorée en débutant la spéléo il y a bientôt 40 ans. Alors pointe une petite angoisse : l'aménagement n'a-t-il pas tout dénaturé ?

Le tunnel d'accès pas trop rectiligne et aux parois bien travaillées nous amène à un balcon où, lorsque les LEDs s'allument, nous découvrons la Salamandre comme nous ne l'avons jamais vue à la lumière de nos casques. Mise en relief des concrétions, cheminement plutôt discret, rambardes tortueuses en fer brut et cordes pendant dans le puits : notre appréhension s'estompe. Même avec toutes ces couleurs changeantes atypiques sous terre, l'ensemble est plutôt réussi et met en valeur les volumes de l'immense salle. Nous allons pouvoir travailler sans état d'âme !

Accompagnés par Bérénice nous choisissons ensuite l'emplacement de notre station de mesure. Comme nous l'avons vu au 3.1, il est important de pouvoir faire des visées à 360° tant à site positif que négatif et le tout sans gêner le passage des visiteurs. Très vite nous trouvons l'endroit idéal : à mi-pente du cône d'éboulis sous la base du puits d'entrée se trouve un sentier permettant aux visiteurs qui descendent en rappel de rejoindre le cheminement classique. Comme il n'y passera personne aujourd'hui, c'est là que nous allons poser nos appareils et stationner toute la journée.



Le pied du DistoX en place sur le sentier.

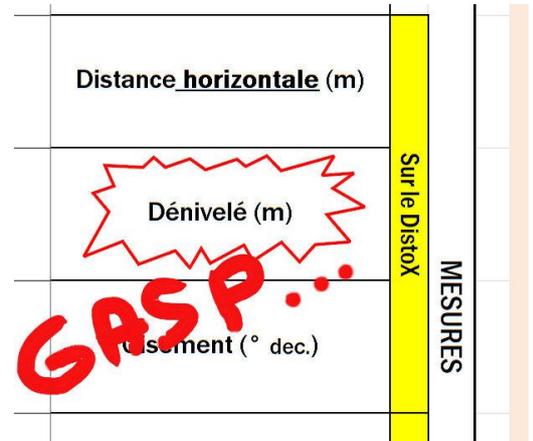
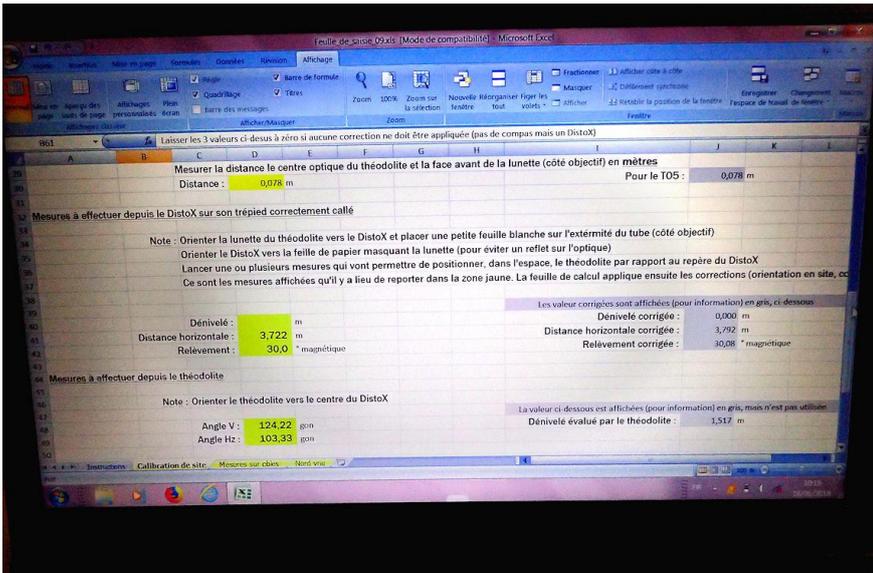
5.2 Petit changement de programme inopiné

Le premier travail consiste à déployer l'appareillage, à installer les trépieds et à les stabiliser : rien ne doit bouger d'un pouce pendant toute la séance. Ensuite nous montons les deux appareils sur leur support respectif, ouvrons nos sièges et installons un petit coin destiné à la saisie des données sur le PC. Les appareils sont allumés, François installe son enregistreur sur le talus pour garder une trace audio de toute la séance et nous voilà fin prêts.

Nous devons commencer par évaluer la position relative des deux appareils l'un par rapport à l'autre et entrer ces informations dans le premier onglet du tableur. Domi vise donc la face avant du théodolite avec le laser et enregistre une visée, François fait de même avec le théodolite vers le DistoX. Il ne reste plus qu'à saisir la distance, l'azimut et le dénivelé dans le tableur. C'est là que les choses vont se corser et montrer qu'il n'est pas simple d'établir un projet à plusieurs quand on est loin les uns des autres et qu'on travaille, certes avec beaucoup de soin, mais sans contact et échange physique direct.

Au moment d'entrer la pente du Disto vers le théodolite, Domi s'aperçoit que le tableur refuse d'inscrire les quelques degrés et décimales mesurés. Après trois essais c'est la découverte de ce qui aurait pu sauter aux yeux avant si... Sur le tableur les pentes ne sont pas des angles en degrés mais des dénivelés en mètres ! Le pire c'est que l'onglet suivant, celui où nous devrions saisir toutes les visées faites dans la salle, est construit de manière identique (voir 2.6.4.2 et 2.7.2.2). Pour le coup, le PC va donc être inutilisable : nous allons devoir repousser la saisie des valeurs mesurées à plus tard, après modification du tableur.

EVALUATION DES DISTOX



Petit instant de consternation : pas de pentes angulaires mais des mesures de longueurs de dénivelés.

Mais que s'est-il donc passé ?

Généralement, lorsque quelque chose grippe, c'est la conséquence de plusieurs facteurs additionnés.

Tout d'abord les nombreux échanges que nous avons eus par mail lors de la préparation de cette expérience ne présentent pas la même liberté qu'un dialogue de vive voix en « présentiel » comme on dit dans la novlangue. Si nous avons été côte à côte lors du montage du fichier Excel, peut-être que nos deux vécus différents auraient fini par se dévoiler et nous crever les yeux. François topographie en effet avec un DistoX310 d'origine associé à un compas et moi à l'aide d'un DistoX2 modifié avec la carte électronique de Beat Heeb. Nous le savions déjà bien entendu, mais nous n'avions pas mis le doigt sur une différence de taille : sur son DistoX310 François affiche toujours les pentes en dénivelé métrique et moi sur mon DistoX2 toujours comme des angles mesurés en degrés.

De plus, suite à une petite confusion entre degrés et grades lors de notre première expérience, au Col de Thalys, François avait insisté fortement : « Il est bien en degrés cette fois ton Disto ? » Ah pour sûr, maintenant oui il l'est !

En réalité, le Disto d'origine peut également afficher les pentes en degrés, mais sa résolution d'affichage est de 0.5 °. Il semble par contre qu'en interne la précision soit meilleure. De ce fait, quand on demande au Disto de calculer lui-même le dénivelé et la distance projetée, le résultat est bon avec une excellente résolution de l'ordre du millimètre (voir 2.3.2.2). Cela ne signifie pas que la précision soit d'un millimètre mais, au moins, il n'y pas de soucis de résolution. Quant à lui, le DistoX modifié pour la topographie souterraine affiche la pente avec une résolution de 0.1 ° ce qui est déjà fort correct.

Enfin, de son côté Domi, pas très à l'aise en géométrie, au moment de relire le fichier minutieusement élaboré par François, s'est plus attaché à la forme qu'au fond et a surtout veillé à l'orthodoxie orthographique (déformation professionnelle oblige). Du coup, laissant son camarade expert se dépatouiller avec les formules trigonométriques et les cellules calculées, il est passé à côté de cette subtile mais primordiale différence.

Pour la petite histoire, en topo spéléo nous utilisons souvent des logiciels embarqués comme Auriga ou PocketTopo sur PDA, TopoDroid sur tablette ou smartphone. Nous ne nous préoccupons plus de la trigonométrie depuis longtemps : ce sont ces logiciels qui font les calculs à notre place. D'ailleurs, même ceux parmi nous qui relèvent sous terre les données à la main sur un carnet, confient ensuite cette tâche à un programme de topographie comme VisualTopo, Therion, Topo Calc'R, Cybertopo, CSurvey, GHTopo voire Toporobot. Or, en appuyant sur la touche SMART (Mode horizontal) on peut faire apparaître la dénivelée en mètres, ce que fait d'ailleurs François sur son appareil non modifié.

Hélas, comme cette mention n'était pas indiquée sur la traduction française initiale de la notice du DistoX2, nous ignorons parfois qu'il en est capable. Voilà qui aurait résolu le problème de façon plutôt simple, non ?!!! En tout cas, ça a au moins permis d'améliorer la version française du Manuel Utilisateur du DistoX2³³.



François qui annonce les valeurs et Jean-Pierre concentré sur ses notes !

Ce souci d'unités me rappelle la triste aventure de la sonde « Mars Climate Orbiter » qui fut détruite dans son approche martienne le 23 septembre 1999. L'enquête qui suivit conclut que deux logiciels utilisés pour la manœuvre fonctionnaient avec des unités différentes : l'un calculait en système anglo-saxon et l'autre en système métrique. Cette confusion causa une erreur d'altitude de plus de 130 km et conduisit la sonde à la destruction.

³³ Voir le manuel 2018 en français ici :

<http://souterweb.free.fr/boitaoutils/topographie/annexes/Manuel%20d%27utilisation%20du%20Leica%20DISTO%20X2.pdf>

Comme quoi, se mélanger les pinceaux dans les unités ça arrive même aux meilleurs... À moins qu'à Cap Canaveral ils aient oublié de lire la notice d'utilisation de la sonde ?

Bref, il ne nous reste plus qu'à ranger le PC... Et dire que Domi avait acheté une seconde batterie pour avoir une meilleure autonomie ! Heureusement au final notre mission sera moins compromise que celle de la NASA : nous dénichons deux ou trois feuillets A4 et un crayon. Jean-Pierre va donc se dévouer pour tenir le rôle de secrétaire de séance, en notant patiemment les mesures appuyé sur la valise contenant le PC : l'ordinateur aura au moins servi à ça !

5.3 Une journée de mesures

La suite de la journée se déroulera sans encombre. Nous ferons une première série de visées le matin avec le DistoX2 de Domi et, après deux ou trois tâtonnements, le rythme s'enchaîne avec efficacité. Peu après le début de l'expérience, nous avons reçu la sympathique visite de Daniel Lelièvre avec qui nous évoquerons nos anciens souvenirs de spéléologie sur le plateau de Méjannes et l'historique de l'aménagement de la cavité. Petite pause déjeuner sur la terrasse parmi les visiteurs du jour (qui se demandent probablement ce que nous pouvons bien faire là avec nos tenues de chantier et nos casques de spéléo), et c'est reparti.



Petite pause entre deux séries de visées : et si on allait manger ?

Toujours bercés par un léger fond sonore plutôt original, diffusé par des enceintes cachées de-ci de-là, nous démarrons la seconde série de mesures avec le DistoX2 de Jean-Michel. L'après-midi sera ponctuée par le passage de groupes de visiteurs, allemands pour la plupart, mais aussi de lycéens qui sont tout contents de voir de « vrais spéléos » et nous font coucou de la main. Nous sommes à l'écart du parcours et cela ne dérange pas plus eux que nous. Les affaires tournent comme sur des roulettes et la seconde série avance vite ; du coup, nous disposons d'un peu de temps.

À la demande de Nikita, la guide que nous avons croisée tout à l'heure, nous allons donc pouvoir aller mesurer quelques concrétions emblématiques de la salle³⁴.

Au retour de notre petite visite (bien plus facile évidemment qu'à l'époque de l'acéto) et avant de tout ranger, nous notons les hauteurs que nous venons d'évaluer avec le DistoX1 de Jean-Pierre. La grande colonne de droite (vers l'Est) mesure 19.67 m, la seconde qui est juste derrière celle-ci fait 18.27 m et le cierge de gauche (vers l'Ouest) 8 bons mètres. Quant à « Big Ben », comme il n'est pas possible de le mesurer depuis le bas à cause de sa forme, il nous faudra attendre quelques calculs trigonométriques pour connaître sa hauteur. Une fois les données entrées dans une calculatrice trigonométrique, nous trouverons qu'il atteint 17 mètres. C'est donc le grand pilier qui tient le record !

Ces valeurs sont des longueurs minimales : il n'est en effet pas aisé de décider à quel endroit se trouve la base exacte d'une stalagmite quand elle repose sur une masse de calcite et pas sur de la roche en place. Ces mesures ont donc été prises à partir de la partie basse qui morphologiquement ressemblait plus à la partie supérieure qu'à la calcite sous-jacente. En comptant tout ou partie de leur assise stalagmitique, on aurait facilement pu y ajouter un ou plusieurs mètres.

Voilà, il est 15h49, nous éteignons l'enregistrement audio, quittons la cavité par le tunnel de sortie, saluons nos hôtes et nous donnons rendez-vous sur le Net pour l'exploitation des données.

6 ANALYSE DES MESURES DE L'EXPÉRIMENTATION

6.1 AVANT PROPOS

Mis à part le calcul de la hauteur de « Big Ben » (voir plus haut), il nous restait pas mal de travail avant d'essayer de tirer la moindre conclusion de toutes ces mesures.

La première des choses à faire fut d'échanger entre nous les différents documents : numérisations des notes papier, enregistrements audio et données récupérées des Disto via le logiciel de topographie. Ensuite vint la saisie des nombres dans une feuille de calcul destinée ensuite à être incorporée au fichier Excel modifié de main de maître par François afin de pouvoir exploiter les pentes angulaires en degrés en lieu et place des dénivelés (voir 5.2).

³⁴ François a hésité à apporter son DistoX310 non modifié. Dommage, car ce dernier intègre une fonction qui permettrait d'obtenir les hauteurs des stalagmites avec 2 visées depuis un même point.

6.2 MESURES BRUTES SUR LE DISTOX N°1 (CELUI DE DOM)

MESURES DISTO N° 1					
N° de mesure	Sur le DistoX			Sur le théodolite	
	Distance optique (m)	Angle de pente (°)	Gisement (° dec.)	Angle Hz horizontal (gon)	Angle V vertical (gon)
1	61,291	0,7	273,8	71,30	98,90
2	61,929	0,3	264,3	60,80	99,40
3	52,722	-1,0	242,1	36,25	100,75
4	39,736	-0,5	224,9	17,42	100,01
5	37,978	1,0	200,6	388,42	98,20
6	33,237	7,0	187,1	372,08	90,49
7	21,202	7,8	176,7	358,10	88,50
8	29,694	29,8	166,7	345,80	62,00
9	29,364	30,4	151,1	326,00	62,30
10	19,679	27,7	119,7	283,50	66,70
11	21,591	27,2	98,1	260,60	69,50
12	17,378	26,9	72,5	231,00	72,25
13	12,077	20,0	50,8	208,80	81,18
14	14,202	10,9	28,3	190,50	89,42
15	18,358	17,6	10,3	174,70	83,00
16	36,938	12,6	355,7	160,08	86,70
17	5,580	12,1	331,1	148,70	89,85
18	14,953	6,8	311,0	121,00	92,50
19	39,718	13,0	310,6	113,50	85,78
20	40,678	11,8	285,5	86,40	86,50
21	68,162	-10,0	285,0	83,48	110,78
22	20,479	-18,5	279,7	86,22	119,45
23	54,557	-15,5	271,2	69,13	117,00
24	62,483	-13,7	265,4	62,00	115,10
25	39,189	-20,2	259,1	57,58	122,78
26	40,779	-21,8	249,0	45,80	125,00
27	42,476	-22,2	232,8	26,75	125,90
28	10,335	-15,8	212,7	15,00	123,98
29	16,716	-12,7	200,3	390,40	116,95
30	14,345	9,6	167,9	343,15	84,50

EVALUATION DES DISTOX

31	32,013	24,1	260,3	60,78	71,84
32	29,286	24,8	244,7	43,60	69,80
33	34,047	15,4	225,9	19,65	80,65
34	33,588	25,3	193,6	380,25	67,85
35	48,905	-22,8	235,4	29,20	126,40
36	15,918	-29,5	233,8	38,20	137,20
37	36,671	4,0	253,5	51,25	94,53
38	38,715	-22,6	253,4	51,10	125,70
39	33,807	25,2	328,3	132,78	73,60
40	30,049	21,1	320,7	125,50	77,80
41	25,024	22,9	349,7	154,85	77,00
42	44,274	0,0	297,9	99,00	99,78
43	40,128	-5,3	212,1	2,10	106,00

6.3 MESURES BRUTES SUR LE DISTOX n°2 (CELUI DE JEAN-MICHEL)

MESURES DISTO n°2					
N° de mesure	Sur le DistoX			Sur le théodolite	
	Distance optique (m)	Angle de pente (°)	Gisement (° dec.)	Angle Hz horizontal (gon)	Angle V vertical (gon)
1	37,940	2,2	199,4	388,40	96,75
2	38,576	2,5	221,4	15,15	96,40
3	47,396	2,8	240,6	36,85	96,21
4	36,347	3,3	251,8	51,17	95,65
5	54,720	3,7	265,9	64,75	95,47
6	59,473	3,4	285,3	85,50	95,90
7	60,866	2,9	307,2	108,60	96,50
8	28,067	11,3	319,6	125,00	87,90
9	30,524	11,4	329,1	133,90	86,90
10	36,482	11,5	339,3	143,28	87,79
11	31,518	11,5	1,9	165,58	88,12
12	17,971	11,6	19,0	181,45	88,53
13	13,646	17,7	48,4	206,08	83,05
14	17,728	35,0	79,4	235,10	63,83
15	19,301	34,2	112,2	271,25	60,63

EVALUATION DES DISTOX

16	14,194	31,1	132,6	290,49	60,18
17	14,647	30,9	151,1	316,30	57,28
18	16,775	24,8	162,7	336,39	64,79
19	24,683	17,6	178,4	361,39	76,20
20	37,365	9,8	202,0	391,82	87,31
21	36,240	10,0	222,3	17,00	87,20
22	26,910	31,0	221,4	19,40	60,55
23	27,706	31,8	241,3	43,90	61,20
24	28,006	32,5	264,6	70,81	62,60
25	27,893	32,8	264,6	70,80	62,30
26	30,891	33,1	288,1	94,75	63,70
27	29,720	33,6	316,8	123,50	64,85
28	25,512	34,0	342,8	148,38	65,93
29	18,447	33,9	15,8	177,95	67,75
30	21,724	-21,4	303,2	109,58	121,43
31	11,448	-33,2	275,1	92,18	134,68
32	36,095	-23,6	259,1	57,95	126,75
33	64,425	-14,6	249,8	44,89	116,48
34	63,806	-3,7	249,4	45,20	103,82
35	46,968	-17,5	265,1	63,25	119,48

6.4 DETAILS DU FICHER TABLEUR DE COLLECTE DES MESURES BRUTES

Aux points 6.2 et 6.3 ci-dessus sont reproduites les colonnes permettant de recueillir les données mesurées et lues sur les deux appareils.

Mais le tableau Excel ne se limitait pas à ça, il comprenait trois onglets : un onglet intitulé « Instructions » et résumant la méthode par analyse de la parallaxe (détaillée ici dans la partie 2.), l'onglet « Mesures sur cibles » partiellement reproduit ci-dessus destiné à la saisie des mesures et enfin un onglet « Calibration de site » qui ouvrait une feuille de saisie des données statiques descriptives de l'expérimentation.

Les données recueillies au préalable sur cette feuille « Calibration de site » sont indispensables au traitement futur des données. Nous les reproduisons ici pour information et à toutes fins utiles :

Lieu : Grotte de la Salamandre

Date : 5/29/2018

Observation : Pas de référence externe permettant de vérifier le zéro magnétique. Tous les azimuts restent magnétiques.

Note : Le DistoX et le théodolite doivent être disposés à environ 5 m l'un de l'autre, si possible dans le même plan horizontal.

Le DistoX est présumé calibré en site et en azimut.

Le DistoX est paramétré en degrés décimaux et en mètres.

Le DistoX (avec compas intégré) ne sait fournir que la distance optique et l'angle de pente ($0^\circ =$ horizontale).

Le théodolite est mis en station (calage du plan horizontal).

Laisser le DistoX évaluer les distances sur le talon du DistoX (valeur par défaut) et non le taraudage Kodak.

- Mesures à effectuer sur le DistoX après montage sur la tête du trépied :

Mesurer la distance séparant l'axe de rotation en site de la tête, du centre du DistoX (en général quelques cm) exprimée en mètres.

Distance : 0,055 m

Mesurer en mètres la distance séparant le talon du DistoX de l'axe de rotation en azimuth de la tête (en général quelques cm) positif si le talon est en arrière.

Distance : 0,020 m

Distance séparant l'axe du laser de l'axe de symétrie longitudinal du DistoX (décalage latéral du laser)

Distance : 0,005 m Pour un DistoX : 0,005 m

Laisser la valeur ci-dessus à zéro si le relèvement est fait avec un compas.

- Mesures à effectuer sur le théodolite :

Mesurer en mètres la distance entre le centre optique du théodolite et la face avant de sa lunette (côté objectif).

Distance : 0,078 m Pour le TO5 : 0,078 m

- Mesures à effectuer depuis le DistoX sur son trépied correctement calé

Note : Orienter la lunette du théodolite vers le DistoX et placer une petite feuille blanche sur l'extrémité du tube (côté objectif).

Orienter le DistoX vers la feuille de papier masquant la lunette (pour éviter un reflet sur l'optique).

Lancer une ou plusieurs mesures qui vont permettre de positionner, dans l'espace, le théodolite par rapport au repère du DistoX.

Ce sont les mesures affichées qu'il y a lieu de reporter dans la zone jaune ci-dessous. La feuille de calcul applique ensuite les corrections (orientation en site, compas, talon, décalage du laser).

Angle de pente : -3,4 °
Distance optique : 3,722 m
Relèvement : 188,7 ° magnétique

Les valeurs corrigées sont affichées ici en gris (pour information) :

Dénivelé corrigé : -0,221 m
Distance horizontale corrigée : 3,777 m
Relèvement corrigé : 188,78 ° magnétique

- Mesures à effectuer depuis le théodolite :

Note : Orienter le théodolite vers le centre du DistoX.

Angle V : 96,05 gon
Angle Hz : 174,00 gon

La valeur ci-dessous est affichée (pour information) en gris, mais n'est pas utilisée

Dénivelé évalué par le théodolite : -0,235 m

Note : Dans la mesure du possible, avec la nivelle du théodolite, mesurer le dénivelé du DistoX par rapport au théodolite, avec un mètre à ruban comme cible, pour redondance,

Dénivelé mesuré avec la nivelle du théodolite (facultatif) : **0,23 m**

- Correction d'un éventuel compas si le gisement est mesuré avec ce compas et non le DistoX modifié

Correction de rotation du compas	0,00°
Angle du désaxement	0,00°
K (désaxement)	0,00000

Pour le compas IRIS 50 de François M. :

-1,0°
-60,0°
0,0080

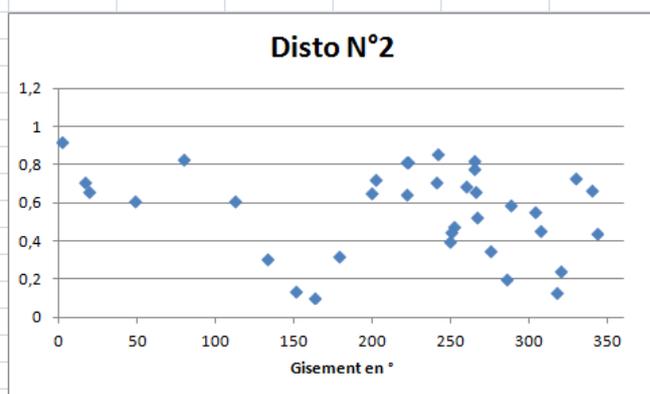
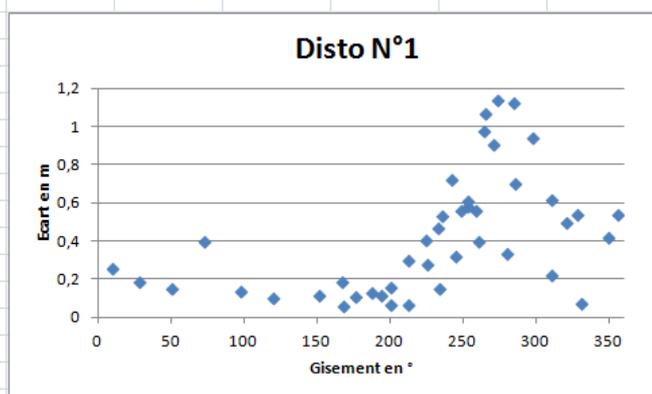
Laisser les 3 valeurs ci-dessus à zéro si aucune correction ne doit être appliquée (utilisation d'un DistoX à la place d'un compas).

Passons maintenant à l'étude des données proprement dite.

6.4.1 Recherche de corrélations

6.4.1.1 Distance 3D entre les deux images

On cherche tout d'abord à repérer s'il existe un rapport entre le gisement (mesure de l'azimut de la cible) et l'écart de distance entre la cible visée et son emplacement réel dans l'espace. En résumé, la position de la cible autour de nous influe-t-elle sur la précision de la mesure.



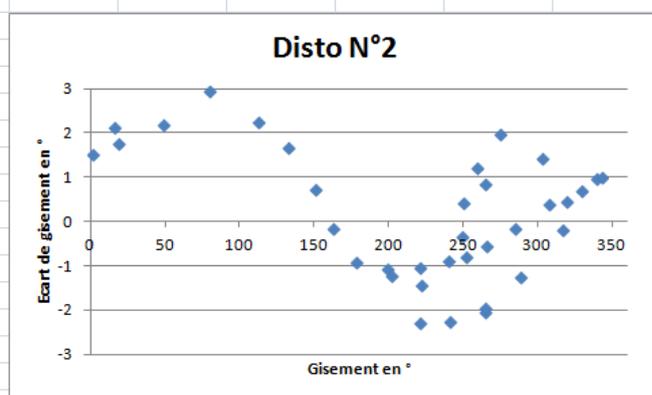
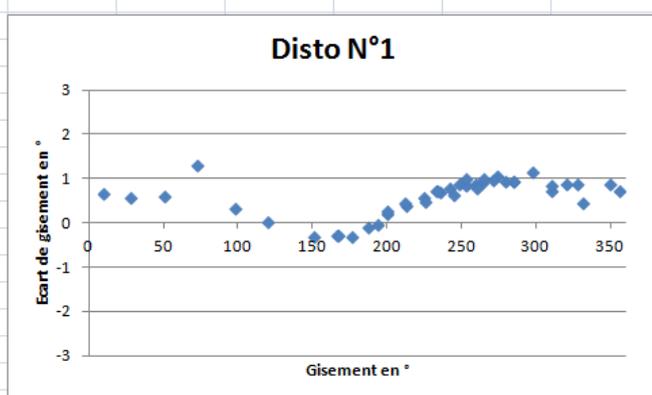
Distance entre le point et son image (en 3D) en m, fonction du gisement

C'était une des hypothèses de départ, mais ici on ne voit pas apparaître de corrélation. Les écarts de distance paraissent identiques pour les deux Disto, mais attention il y a 43 mesures pour le Disto n°1 et seulement 35 pour le Disto n°2.

EVALUATION DES DISTOX

6.4.1.2 Ecart de gisement en fonction du gisement

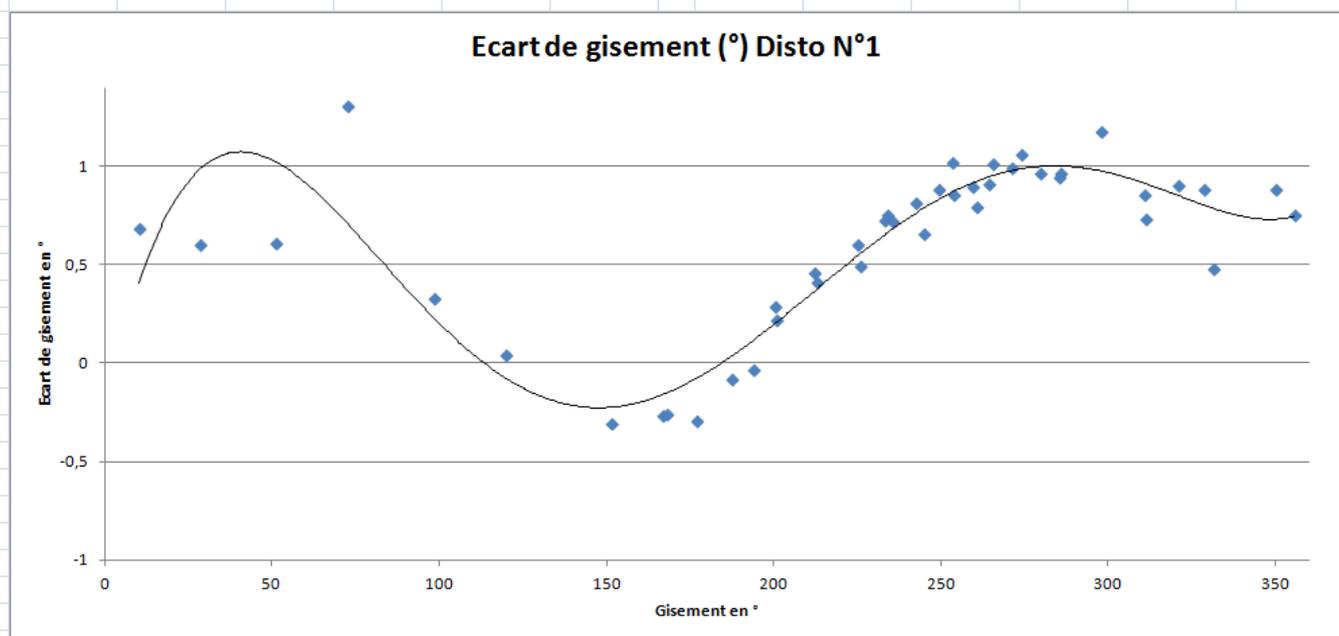
Cette fois nous cherchons à comparer les mesures de gisement relevées par le théodolite avec les mesures d'azimut faites pas les deux Disto. En résumé, nous évaluons la précision de la mesure de l'azimut des Disto à notre disposition.



Ecart entre l'angle calculé et l'angle mesuré en °

Comme on ne s'intéresse ici qu'à l'écart de gisement, ça devient plus intéressant. On voit apparaître une forme sinusoïdale dont l'amplitude est beaucoup plus faible pour le Disto n°1 (2 °) que le n°2 (5,5 °).

Faisons une loupe sur le graphe du N°1



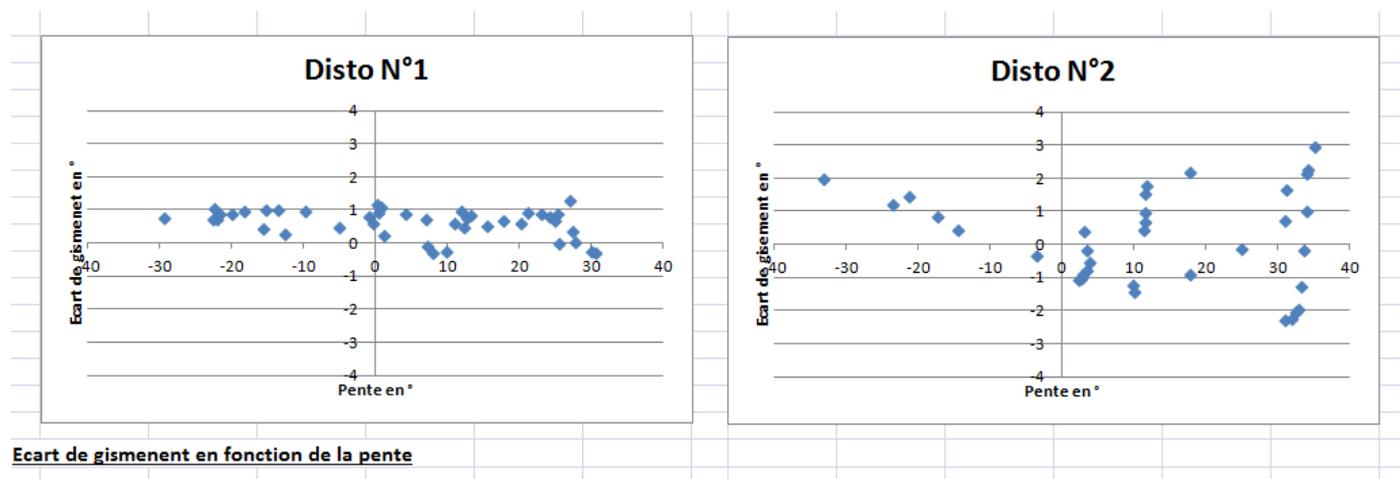
Loupe sur le graph Ecart = f (gisement) pour le Disto N°1

La courbe de tendance est une courbe polynomiale tracée par Excel. Notre problème est le faible nombre de points entre 0 et 150 ° car cette zone correspondait au tumulus présent à la verticale du puits d'entrée naturel de la grotte. Nous n'avons pas osé rester sur ce cône d'éboulis par

rapport au risque de chute de cailloux ; comme nous étions placés légèrement en contrebas, son volume a limité nos visées vers l'« arrière ».

Cette sorte de courbe sinusoïdale a déjà été rencontrée lors de l'étalonnage d'un compas magnétique; elle était cohérente avec une excentricité de la rosace collée. Dans le cas du Disto on observe une particularité : la pseudo sinusoïde n'est pas symétrique par rapport à 0

6.4.1.3 Ecart de gisement en fonction de la pente



La pente a-t-elle une influence sur la précision de la mesure ? On retrouve le fait que la dispersion est plus faible pour le Disto n°1 mais aucune corrélation n'apparaît.

6.4.2 Qu'en penser ?

Tout d'abord, pour le DistoX n°1, la dispersion des écarts de gisement est faible et correspond en gros à ce que donne un compas non corrigé. Toujours pour le DistoX n°1 envisager de corriger en compensant avec une sinusoïde inverse supposerait que le graphe des écarts est indépendant du processus de calibration. J'en doute. L'élaboration expérimentale de l'écart étant très lourde, ce n'est pas une solution simple (comme ça l'est pour un compas).

Ensuite, pourquoi le graphe de dispersion du DistoX n°2 est-il beaucoup plus mauvais ? Dominique dit qu'il a effectué le même processus de calibration pour les deux Disto. Les deux Disto ne seraient néanmoins pas dérivés du même patch matériel. Il y aurait encore des petites pièces « magnétiques » dans le patch du DistoX n°2. On se trouverait alors, un peu, comme dans le cas du graphe d'étalonnage d'un compas magnétique sur un navire où on vient compenser, du mieux que l'on peut, les masses magnétiques environnantes.

Il faut noter également deux autres différences entre ces deux appareils. Leur âge tout d'abord : le DistoX n°2 a été bien plus utilisé que le premier, il a aussi beaucoup voyagé en avion pour des expéditions spéléo en Asie. Ensuite, ses conditions de stockage ont peut-être une importance : le DistoX n°2 a été rangé un certain temps dans la même pochette que le stylet d'une tablette Android, stylet contenant des aimants. Ces deux circonstances sont peut-être à l'origine, pour cet appareil, d'une plus grande difficulté à obtenir de bons résultats au processus d'étalonnage.

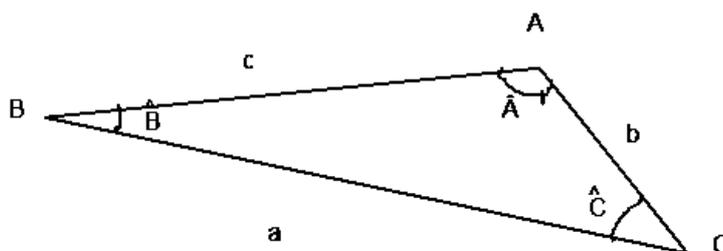
6.4.3 Proposition

On l'a dit, refaire l'étalonnage d'un Disto est une opération relativement contraignante nécessitant une grande rigueur d'exécution et un site adapté (même si on a vu au 3.2.2 qu'il pouvait être assez divers). Il faut tout de même relativiser cette affirmation car avec l'expérience, l'étalonnage d'un Disto devient de plus en plus aisé.

Il est par contre indispensable de disposer d'une méthode pour évaluer la justesse de l'étalonnage avant d'utiliser le Disto. Certains effectuent simplement une petite boucle en évaluant l'erreur de fermeture, ce qui ne permet pas d'identifier une erreur systématique. La méthode consistant à faire 2*4 mesures aller-retour A>B B>A avec roulis est bien meilleure (méthode d'ailleurs préconisée par les concepteurs des logiciels).

Pour y voir clair sur un bouclage simple, il faudrait tenter de vérifier les trois premières égalités du théorème suivant.

Relations métriques et trigonométriques



Théorème :

$$\frac{a}{\sin(\hat{A})} = \frac{b}{\sin(\hat{B})} = \frac{c}{\sin(\hat{C})} = \frac{abc}{2S} = 2R$$

où R est le rayon du cercle circonscrit au triangle ABC.

Avec le Disto on n'accède pas directement aux angles mais on peut les calculer. L'expérimentation est à tenter et permettrait peut-être d'évaluer les non linéarités dans les mesures angulaires. On peut aussi avoir une idée de la présence de cette non-linéarité en comparant les résultats des calculs de coefficients d'étalonnage avec ou sans l'option « NL » (voir au 3.2.2).

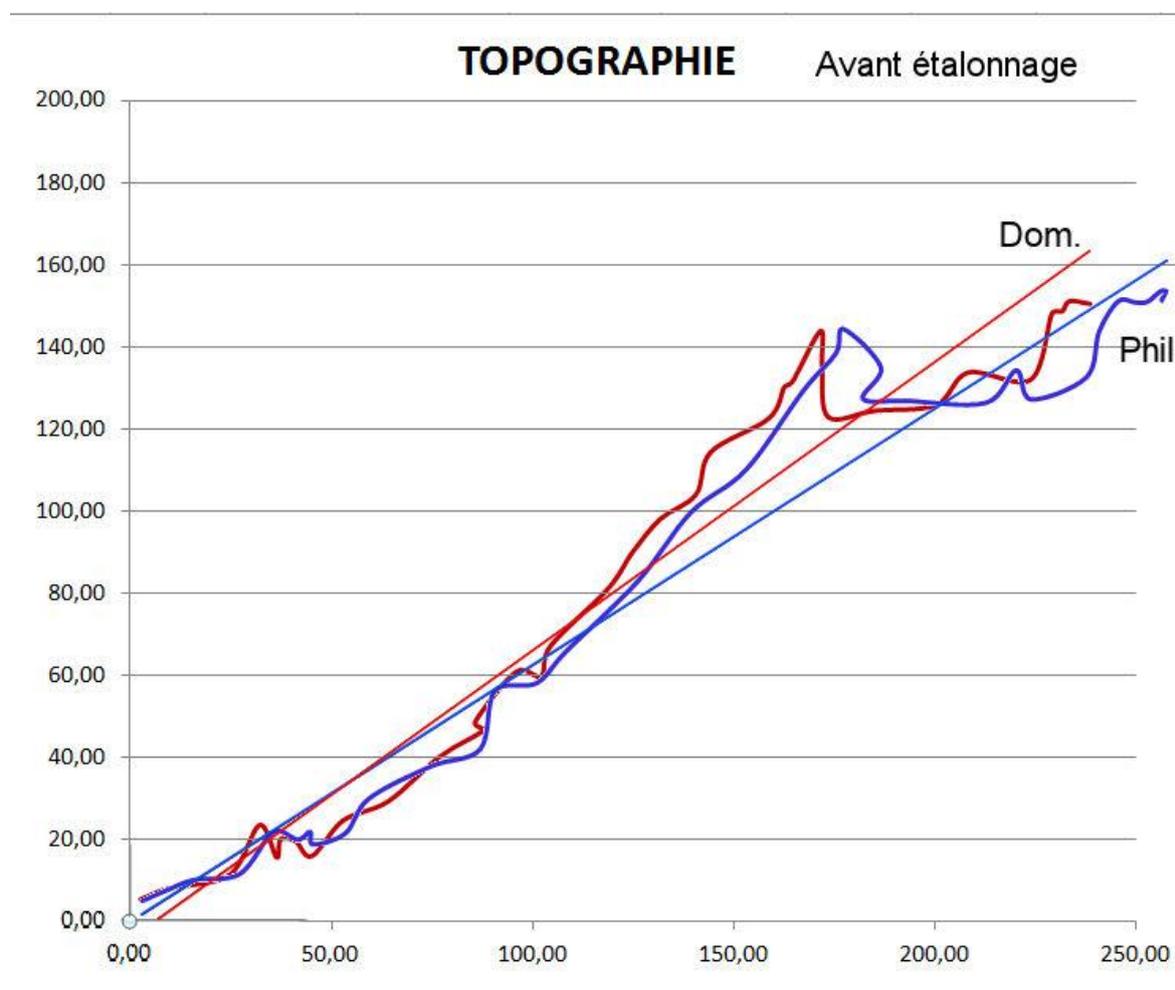
7 EFFETS ET PROPAGATION DES ERREURS DANS UNE TOPOGRAPHIE

Comme Domi possède trois relevés topos d'une seule et même cavité (la Caverne du Maure dans l'Hérault, au-dessus de la vallée de la Vis) dont un (au moins) a été fait avec un Disto mal étalonné, nous allons nous en servir pour tester ce modèle informatique.

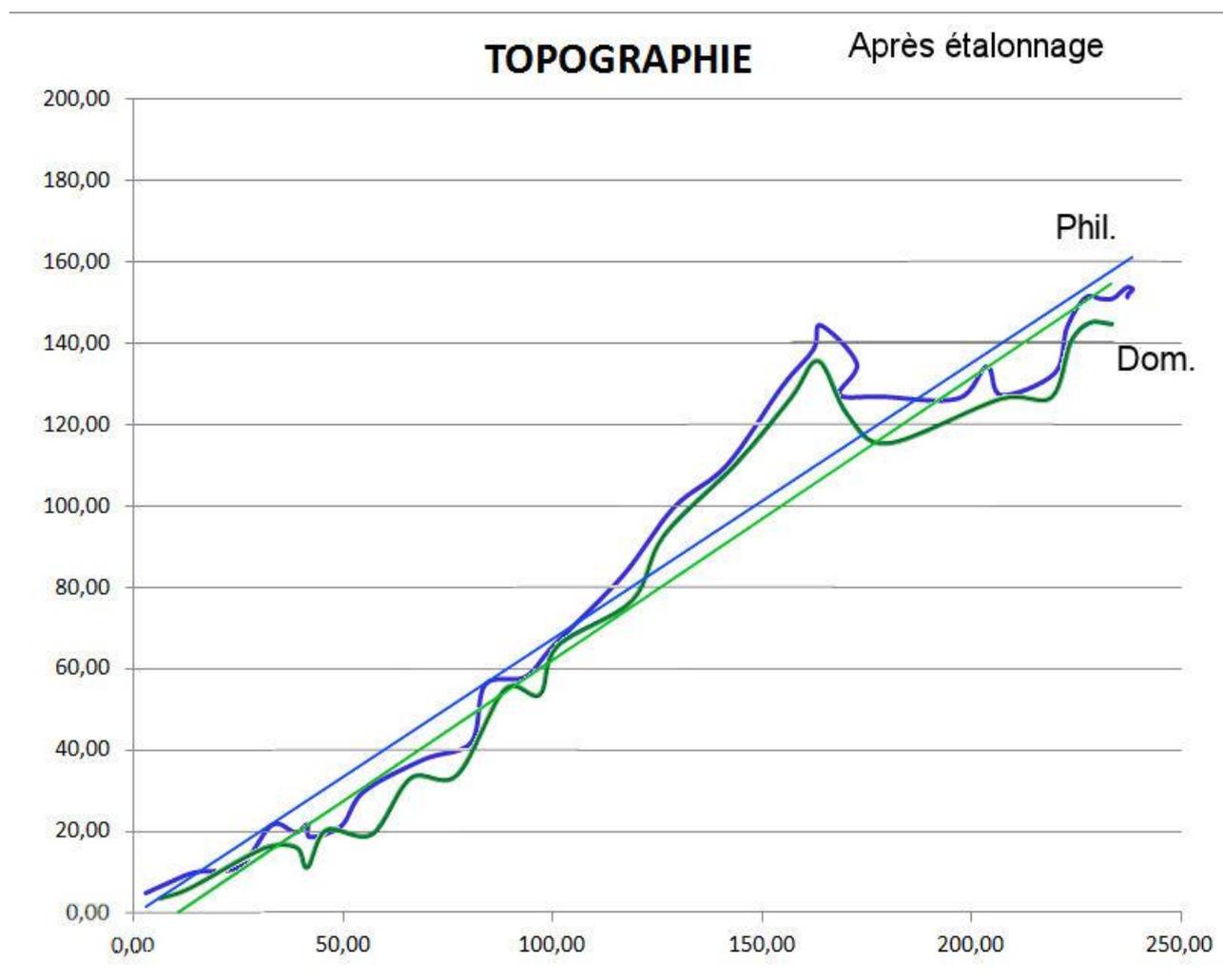
L'avantage de cette topographie par rapport à nos visées en étoile, c'est que cette cavité étant quasi rectiligne, nous pouvons visualiser facilement les conséquences d'éventuelles erreurs sur le plan.

Sur la feuille de calcul Excel construite par François, existe une possibilité de faire varier l'erreur de façon aléatoire (entre deux valeurs butoirs) grâce à la touche F9. Les graphes illustrant les écarts liés à différents problèmes d'excentricité ou de décentrement sont donc eux aussi réinitialisés par un appui sur la touche F9. De plus, sur cette feuille, a été ajouté un graphique qui représente la ligne de cheminement (un plan simplifié de la cavité) telle qu'elle peut apparaître par exemple avec les fenêtres de dessin de TopoDroid ou de PocketTopo.

En superposant les trois lignes différentes deux à deux, on aperçoit bien le décalage angulaire entre les deux topographies de la première sortie, lorsque l'un des deux appareils était mal étalonné. Par extrapolation on comprend que dans ce cas il n'y a aucun espoir de voir les erreurs finir par se compenser : plus la topo va s'allonger, plus elle sera faussée. C'est bien ce que confirment les graphes qui sont globalement ascendants, quels que soient le type et la valeur de l'erreur aléatoire choisie (divers appuis sur F9).



Premier cas avant étalonnage d'un des deux appareils : les lignes moyennes rouge et bleue (Dom. et Phil.) s'écartent progressivement et après 200 mètres divergent déjà de plusieurs degrés. Leur différence de longueur est simplement liée au fait que l'un des deux topographes est allé plus loin dans son cheminement.



Second cas, après étalonnage du DistoX2 (Dom.) les deux lignes moyennes sont quasiment parallèles. On peut tout de même apercevoir encore une convergence plus discrète que précédemment, peut-être liée à l'autre appareil (Phil.).

Nota 1 : La seconde séance topo a été refaite avec un seul des deux appareils. Donc la ligne bleue est la même sur les deux graphes, mais la ligne verte remplace la ligne rouge du graphe précédent.

Nota 2 : Dans les deux graphes, les lignes de couleur ne se chevauchent quasiment jamais car les deux cheminements n'ont pas utilisé les mêmes stations, chacun des opérateurs ayant progressé et topographié indépendamment de l'autre.

8 RÉFLEXIONS SUR LA PRÉCISION D'UNE TOPOGRAPHIE

8.1 DistoX non modifié

Leica garantit la précision des mesures de longueur de ses lasermètres. Par exemple pour le modèle qui nous intéresse (DistoX310) la documentation du fabricant indique : « *Précision $\pm 1,6$ mm, portée maximale 120 mètres* ».

La notice de l'utilisateur préconise également (à la page 16) d'étalonner le capteur d'inclinaison « *Calibrage du capteur d'inclinaison (calibrage de l'inclinaison)* » en 9 étapes illustrées. D'après les informations fournies par Beat Heeb, ce capteur n'est pas modifié par l'installation de la carte X2 mais il est connecté et géré par celle-ci. Après l'installation de la nouvelle carte électronique il n'est donc plus nécessaire d'effectuer l'étalonnage préconisé sur la notice Leica d'origine : la nouvelle procédure d'étalonnage suffit.

8.2 DistoX modifié et exigences spéléologiques

Les besoins des spéléologues en terme de topographie ne sont généralement pas ceux des géomètres experts, ni même des exploitants de mines. Longtemps d'ailleurs les topos de cavités publiées dans les inventaires étaient, comme leurs coordonnées, très approximatives. Ces inventaires sont toujours dans nos bibliothèques et nous les utilisons encore bien souvent. Les points essentiels examinés par le spéléo avant sa sortie d'explo sont bien souvent la profondeur totale et celle des puits (sur la coupe), la longueur du cheminement principal et les différents recoupements de galerie (sur le plan). Puis une fois sous terre et pour de simples sorties classiques, l'immense majorité des spéléos ne fait pas suivre la topographie.

Au fil du temps, l'utilisation des GPS a rendu les coordonnées des entrées bien plus fiables. Ensuite le graphisme, différent pour chaque topographe, a évolué par l'utilisation de symboles de plus en plus normalisés et maintenant une sorte d'uniformisation se fait jour avec l'emploi de plus en plus fréquent de logiciels de dessin vectoriel pour passer du squelette à la représentation finale (on peut parfois le déplorer pour la beauté du geste).

Mais les exigences d'exactitude topographique sont aussi à la hausse. La précision a fait un bond en avant quand les topographes ont remis leurs décamètres ruban ou leurs topofils pour employer des distancemètres laser à la précision millimétrique. Restait le problème de la mesure correcte des pentes et azimuts. Le combiné clino-compas Suunto très prisé ces dernières décennies donnait déjà des résultats fort honorables. Il est en passe d'être abandonné au profit de distancemètres laser Leica modifiés grâce à l'initiative du spéléologue suisse Beat Heeb. Il a mis à la portée de tous (ou presque) un appareil de topographie semi-pro incorporant inclinomètre et compas.

Des topographies spéléo précises sont donc maintenant envisageables. Elles sont utiles pour les grandes cavités complexes, mais aussi en désobstruction par exemple pour confirmer de possibles recoupements de galeries, pour situer les unes par rapport aux autres plusieurs cavités d'un même réseau etc. Une topo fiable servira aussi pour l'ouverture d'une seconde entrée en surface en première approche, avant même l'utilisation d'une balise radio.

8.3 Quelques exemples de précision au DistoX

Pour illustrer le premier exemple, nous allons utiliser ici les données de plusieurs séances de topographie effectuées par un ami dans la grotte exurgence du Garrel à Saint-Jean-de-Buèges dans l'Hérault (voir remerciements en fin d'article). Il s'agit, dans ce réseau complexe de près de

12 kilomètres actuellement relevés, d'une série de grandes boucles topographiées au DistoX2 dont les valeurs ont été traitées par le logiciel Therion³⁵.

%erreur	erreur	longueur	nb-stations	erreur-E	erreur-N	erreur-verticale
0.20%	0.6m	308.3m	51	-0.5m	0.0m	-0.3m
0.95%	1.7m	177.8m	41	1.6m	-0.5m	-0.2m
0.94%	1.6m	175.2m	55	-0.2m	0.3m	1.6m
0.55%	1.1m	192.3m	29	-0.1m	-0.7m	0.8m
0.48%	2.6m	537.2m	94	-2.3m	0.5m	1.0m
0.43%	0.9m	208.3m	43	-0.5m	-0.3m	0.6m
0.39%	0.8m	193.4m	43	0.7m	-0.2m	0.1m
0.35%	1.2m	347.3m	46	-0.3m	-1.0m	-0.6m
0.32%	0.7m	210.6m	51	0.1m	0.4m	-0.5m
0.24%	1.6m	682.1m	139	0.2m	1.6m	0.0m
0.20%	0.6m	308.3m	51	-0.5m	0.0m	-0.3m

Pas besoin d'être un expert pour constater que les bouclages sont plutôt bons. En y regardant de plus près on ne distingue pas d'erreur dominante systématique et avec une erreur moyenne de 0.46% on peut considérer que le résultat, qui serait inacceptable pour un bornage de géomètre, est excellent pour l'utilisation que nous faisons de la topographie au cours de notre activité favorite.

Pour compléter cette remarque, voici ci-dessous une boucle topo réalisée avec un DistoX310 non modifié et un compas IRIS50 étalonné³⁶ pour compenser les erreurs. Cette méthode utilise deux petits pieds : un pour le DistoX310 (voir 2.8.3) et l'autre pour une cible rétro réfléchissante. Les mesures au compas sont faites avec soin et les valeurs données par le compas sont ensuite corrigées pour annuler l'erreur systématique (sans incidence sur une boucle) et l'erreur d'excentricité.

Caractéristiques de la boucle :

- Longueur optique totale : 378 m
- Nombre de visées : 14
- Longueur des visées : 20 m en moyenne avec 3 visées de 40, 50 et 60 m
- Erreur de fermeture en plan : 1.12 m
- % d'erreur plane : 0.3 %
- Erreur de fermeture verticale : 0.18 m ou 0.3 °
- % d'erreur verticale : 0.5 %

Voilà qui est globalement conforme aux précisions obtenues dans les boucles précédentes (DistoX2 au Garrel) et qui confirme que le fait d'avoir des visées longues ne dégrade pas la précision. La précision d'un compas de qualité aux erreurs compensées par le calcul semble donc être similaire à celle d'un DistoX2 correctement étalonné.

³⁵ Therion est un logiciel libre de topographie vectorielle pour Linux, Mac OS ou Windows. Il a été créé par des spéléologues slovaques à partir de 2002. Voir : <https://therion.speleo.sk/>

³⁶ Voir les documents d'évaluation du compas IRIS 50 disponibles sur Souterweb (note 26 ci-dessus).

9 CONCLUSION

Un article écrit en 2009 par Beat Heeb présente un algorithme général pour l'étalonnage de systèmes compas / clinomètre électroniques à trois axes et donne une analyse de ses propriétés³⁷. Un autre article plus récent (2018) de Marco Corvi³⁸, créateur du logiciel TopoDroid, établit mathématiquement qu'un distancemètre laser du type DistoX correctement étalonné, donne des mesures d'azimut exactes (à la fois justes et fidèles). Notre objectif était d'essayer d'évaluer la réalité de cette exactitude et par la même occasion, après analyse des données, de mieux comprendre le fonctionnement des corrections d'étalonnage de ce type d'appareil. Enfin, serait-il possible d'envisager une méthode supplémentaire de correction des erreurs résiduelles post-étalonnage pour améliorer encore la précision ?

Premier point positif, notre protocole de test a bien évolué et il est désormais efficace et bien rodé. Ensuite, l'analyse des données par François et l'utilisation de modélisations avec le tableur semble bien démontrer la corrélation forte entre les corrections d'étalonnage et la précision des valeurs mesurées. Les esprits critiques diront qu'on savait déjà qu'il fallait que le DistoX soit bien étalonné, ce n'est pas tout à fait faux. Mais enfoncer le clou ne fait pas de mal, surtout si on ne veut pas déchanter après une séance de topographie sans valeur pour cause d'appareil mal réglé.

La procédure de vérification est donc à répéter de façon systématique avant chaque topographie en effectuant la double méthode de l'aller-retour avec roulis suivi d'un petit circuit fermé (boucle). Le moindre doute doit imposer un étalonnage minutieux : il est donc préférable de s'y prendre deux ou trois jours avant la séance topo pour ne pas être forcé d'improviser la séance d'étalonnage n'importe où. En cas de force majeure il devrait être possible d'utiliser un étalonnage précédemment enregistré. Dans cette situation il sera préférable d'utiliser un fichier assez récent, en effet la grosse inconnue reste encore la question suivante : « Qu'est-ce qui fait dériver l'étalonnage d'un DistoX2 à batterie amagnétique, pourquoi et comment ce phénomène se produit-il ? ». Car même si Beat Heeb précise en conclusion d'un de ses articles « *L'expérience montre que l'étalonnage doit être répété de temps en temps pour éviter la dégradation des performances due à la dérive et au vieillissement des composants.* » il est arrivé à certains d'entre nous de perdre subitement l'étalonnage du DistoX2 sans raison identifiable a priori.

Pour un topographe féru de précision, notre expérimentation a aussi démontré qu'il était possible d'améliorer encore la qualité des données obtenues, mais uniquement au prix d'un post traitement qui ne se fera pas sur un périphérique embarqué. Si on veut bien se passer du traitement automatisé des visées par PocketTopo ou TopoDroid et que l'on passe par un tableur pour les rectifier avant d'effectuer les calculs trigonométriques, alors la précision en sera encore améliorée. Pour autant cette procédure est complexe à mettre en œuvre et ne peut être envisagée qu'à titre exceptionnel dans des cas bien particuliers.

Finalement a-t-on véritablement franchi un cap dans l'exactitude des mesures en passant d'un combiné clino-compas de qualité (couplé à un décamètre ruban) à une association DistoX + PDA

³⁷ Cet article est disponible (en anglais) à l'adresse suivante :

<https://paperless.bheeb.ch/download/Calibration.pdf>

³⁸ Cet article est disponible (en anglais) à l'adresse suivante :

<http://marcocorvi.altervista.org/caving/TDdocs/Accuracy-20180413.pdf>

ou DistoX + Android ? L'amélioration a probablement été moindre pour les azimuts que pour les mesures de distances. Mais par contre, cet appareil nous a sérieusement simplifié la vie et a rendu les séances de topographie souterraine bien plus rapides. En contrepartie, il ne faut jamais perdre de vue que sa précision pour la mesure des azimuts est directement liée à la qualité de son étalonnage. Par exemple, si vous utilisez le processus d'étalonnage de PocketTopo, celui-ci vous fournit après calcul des coefficients d'étalonnage un pourcentage d'erreur moyenne appelée « delta³⁹ », il est préconisé par le concepteur d'avoir une valeur de delta inférieure à 0.5 qui devrait correspondre à une erreur moyenne de $\pm 0.5^\circ$. Pourtant, nous avons pu constater dans notre expérience qu'avec un delta de 0.25 l'imprécision des azimuts est de l'ordre de $\pm 0.75^\circ$, et qu'avec un delta de 0.5 nous arrivons à une imprécision de $\pm 2.5^\circ$, soit un erreur trois fois plus importante !

Restent ensuite les difficultés liées à la technologie : compétences nécessaires pour bricoler l'appareil d'origine, procédure d'étalonnage, charge des batteries, sensibilité du matériel aux chocs, aux immersions et à la boue, problème de Bluetooth, bugs informatiques sur les PDA ou les tablettes, coût à l'achat (Disto + carte + accu + chargeur + périphérique de saisie + caisson de protection). Pour certains d'entre nous, il est concevable que cette énumération soit alors rédhibitoire. Dans ce cas, la simplicité d'emploi et la fiabilité du combiné Suunto associé au décamètre et à un simple carnet de notes l'emportent encore. Pour d'autres, le décamètre a été avantageusement remplacé par un distancemètre laser non modifié dont les mesures de longueurs sont fiables, précises et qui est d'une utilisation aisée (sauf en zone très aquatique). La fonction clinomètre de certains modèles comme le DistoX310 a également conquis nombre d'entre nous qui délaissent alors le combiné Suunto au profit d'un Disto couplé à un compas.

Vous l'aurez compris il n'y a pas encore de procédé miracle et uniforme qui convienne à la fois à toutes les pratiques et toutes les bourses et si l'utilisation du distancemètre laser modifié du type DistoX a apporté un plus indéniable au spéléo topographe, son point faible reste encore le processus d'étalonnage.

10 REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements à (par ordre alphabétique) :

- Bérénice Berthelot et Daniel Lelièvre (Grotte de la Salamandre, 30) qui nous ont gentiment ouvert les portes de la cavité et grandement facilité notre journée de travail,
- Dominique Lacroix (CLPA) pour avoir déniché le support amagnétique du Disto dans son matériel de dentisterie,
- Jean-Michel Salmon (SCM) pour le prêt de son DistoX2,
- Jean-Pierre Rouges (CLPA) pour son aide précieuse pendant l'expérience et le prêt du DistoX1,
- Marco Corvi (TopoDroid) et Beat Heeb (PocketTopo) pour les nombreux échanges de mails et d'informations que nous avons eus avec eux,

³⁹ Le calcul de « delta » est détaillé à la page 12 de l'article suivant :

<https://paperless.bheeb.ch/download/Calibration.pdf>

- Pascal Moinard (SSF 30) pour avoir facilité notre contact avec la grotte de la Salamandre,
- Philippe Vernant pour la fourniture des données des boucles topographiques de la Grotte Exurgence du Garrel et de la Caverne du Maure (34).

Et enfin notre infinie reconnaissance à Dame Nature pour avoir bâti pendant des millénaires une si belle cavité que l'aménagement récent a su mettre en valeur.

François MARCHAND (S.C. du Jura)

Dominique ROS (S.C. de Montpellier)

juillet 2018